INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



ECOLOGIA DE LOS COYOTES

Junio 1980

200 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 45
Junio 1980

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

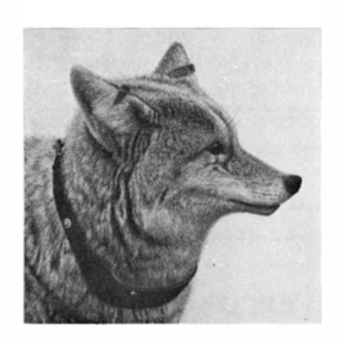
José Luis Somalo: *Guerra química: rearme o desarme;* Fernando Plaza: *Muerte súbita del niño;* Juan Francisco Martín y Paloma Liras: *Proteínas útiles obtenidas a partir de bacterias recombinantes;* Amando García: *Vidrios metálicos;* Manuel Puigcerver: *Estructura del universo primitivo;* Joandomènec Ros: *Ecología de los coyotes;* Cristóbal Mezquita: *Transporte de sustancias en las células nerviosas;* Luis Bou: *Juegos matemáticos;* José E. Myro y Alicia Menéndez: *Taller y laboratorio*

Ciencia y sociedad:

Antonio Blanco

Libros:

Luis Alonso, Juan Rof Carballo y Pedro Molera



LA PORTADA

La ilustración de la portada representa un coyote (*Canis latrans*) que ha sido equipado con el fin de poder investigar su comportamiento en la naturaleza (véase "Ecología social de los coyotes", por Marc Bekoff y Michael C. Wells, en este número). Incluso en aquellos casos en los que el animal no puede ser identificado visualmente por las etiquetas coloreadas que se le han colocado sobre las orejas, su rastro puede seguirse mediante un pequeño transmisor de radio que sujeta contra su garganta el collar que rodea el cuello. Los coyotes viven en diversos hábitats del Canadá, los Estados Unidos y América Central. La radiotelemetría ha sido útil en el estudio de movimientos de gran alcance de animales solitarios y de grupos.

Suscripciones:
Prensa Científica, S.A.
Calabria 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 2200 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 36 U.S.$
Ejemplar atrasado ordinario:
225 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
340 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239, Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovín
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Miguel Munill
Balmes, 191, 2.º, 2.ª, Barcelona-6
Tels. 218 44 45 y 218 40 86

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Marvin Mattelson

Página	Fuente	Página	Fuente
19-27	Ilil Arbel	89	W. Perry Conway
6-7	Frank R. Porschatis, *The Salt Lake Tribune*	90	Franz J. Camenzind
8-10	Adolph E. Brotman	91-96	Albert Miller
12	U.S. Army	101	David S. Forman, Ante L. Padjen y George R. Siggins, National Institute of Mental Health
14-15	Adolph E. Brotman	102	Alan D. Iselin
16	U.S. Army	103	Mark H. Ellisman, Universidad de California en San Diego
20-30	F. Flores, F. García Moliner y M. Alonso	104	Alan D. Iselin
33	Richard L. Naeye y Milton S. Hershey, Facultad de Medicina de la Universidad de Pennsylvania (*izquierda*); Ilil Arbel (*derecha*)	105	Bernard W. Agranoff, Universidad de Michigan (*arriba*); Alan D. Iselin (*abajo*)
34	Ilil Arbel	106	Annica Dahlström, Universidad de Göteborg
35-36	Richard L. Naeye y Milton S. Hershey, Facultad de Medicina de la Universidad de Pennsylvania	107	Alan D. Iselin
47	Fritz Goro	108	James H. Schwartz, Universidad de Columbia
48-55	Bunji Tagawa	110	Alan D. Iselin
59	Fritz Goro	114-120	Ilil Arbel
60-68	Allen Beechel	123	A. G. Klein, Universidad de Melbourne
70	Sigrid R. Herd	124-126	Ben Rose
75-84	Jerome Kuhl		

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Guizpúzcoa, 36 (local 1) Barcelona-20
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda
Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

MATTHEW MESELSON y JULIAN PERRY ROBINSON ("Guerra química: rearme o desarme") comparten desde hace tiempo tareas de alto nivel relacionadas con la prevención de la guerra química y biológica. Meselson ostenta la cátedra Thomas Dudley Cabot de ciencias naturales de la Universidad de Harvard. Graduado por la Universidad de Chicago, obtuvo el grado de doctor en física y química por el Instituto de Tecnología de California en 1957. Además de su labor científica fundamental en genética molecular, Meselson ha dedicado gran parte de su tiempo y de sus energías a través de los años al análisis de problemas relacionados con el armamento químico y biológico. Se le considera una de las piezas clave en el proceso político que desembocó en la firma de la Convención sobre Armas Biológicas de 1972. Robinson, adscrito a la Unidad de investigación de ciencias políticas de la Universidad de Sussex, es especialista en tecnología militar y control de armamentos. Nació en Jerusalén y cursó estudios en la Universidad de Oxford, donde se graduó en químicas.

FERNANDO FLORES SINTAS y FEDERICO GARCIA MOLINER ("Excitaciones en superficies sólidas") enseñan física del estado sólido en la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Flores trabajó como investigador durante cinco años en el Gabinete de Aplicaciones Nucleares a las Obras Públicas (M.O.P.) y durante diez en la Universidad de Madrid; ha pasado también por el Imperial College de Londres, la Universidad Politécnica de Lille y el Centro Internacional de Física Teórica de Trieste. Dirige en la actualidad el departamento de física del estado sólido de la Universidad Autónoma de Madrid. García Moliner es doctor en ciencias físicas por las Universidades de Cambridge y de Madrid (Complutense). Profesor de investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y catedrático honorario de la Universidad Autónoma de Madrid, es también miembro del Comité de estado sólido del Centro Internacional de Física Teórica. Ha trabajado en las Universidades de Cambridge e Illinois, en el Instituto de Química Física del CSIC y, actualmente, en el Instituto de Física del Estado Sólido (CSIC y UAM). Junto con Flores Sintas acaba de publicar el libro *Introduction to the Theory of Solid Surfaces* (Cambridge University Press).

RICHARD L. NAEYE ("Muerte súbita del niño") preside el departamento de patología de la Facultad de Medicina de la Universidad del estado de Pennsylvania. Inició sus estudios superiores en la Universidad de Colgate, doctorándose por Columbia en 1955. Antes de su incorporación al claustro universitario de Pennsylvania, en 1967 enseñó patología en la Facultad de Medicina de la Universidad de Vermont. El objetivo primordial de su investigación han sido las enfermedades del feto y del recién nacido. "Me interesan, en particular", escribe, "los factores ambientales que influyen de manera específica sobre los trastornos antenatales, como el uso de tabaco por la madre, coito, nutrición, etcétera".

WALTER GILBERT y LYDIA VILLA-KOMAROFF ("Proteínas útiles obtenidas a partir de bacterias recombinantes") han colaborado en el desarrollo de técnicas utilizadas en la manipulación genética de moléculas de ADN. Gilbert profesa biología molecular en la Universidad de Harvard. Graduado en esta universidad, obtuvo su doctorado en matemática por la de Cambridge en 1957. Comenzó su carrera como físico teórico, pero se interesó por el trabajo experimental en genética molecular hace aproximadamente veinte años. Villa-Komaroff enseña microbiología en la Facultad de Medicina de la Universidad de Massachusetts.

PRAVEEN CHAUDHARI, BILL C. GIESSEN y DAVID TURNBULL ("Vidrios metálicos") son científicos especializados en materiales. Chaudhari trabaja en el equipo de investigación del Centro de Investigación Thomas J. Watson de la International Business Machines Corporation. Nacido en la India, cursó sus estudios en el Instituto de Tecnología de Kharagpur, alcanzando la licenciatura en el año 1961. A continuación marchó a los Estados Unidos con el fin de proseguir sus estudios, doctorándose por el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1966. Giessen es profesor de química en la Universidad del Nordeste, donde además es director asociado del Instituto de Análisis Químico, Aplicaciones y Ciencia Forense. Nació en Pittsburgh pero se educó en Alemania. Estudió en la Universidad de Göttingen, alcanzando allí el grado de doctor en el año 1958. Turnbull ostenta la cátedra Gordon McKay de Física Aplicada en la Universidad de Harvard. Se doctoró en química física por la Universidad de Illinois en al año 1939. En 1962 ingresó en el claustro universitario de Harvard.

JOHN D. BARROW y JOSEPH SILK ("Estructura del universo primitivo") son astrofísicos teóricos con un interés especial en la cosmología. Barrow es investigador y encargado de curso en la Universidad de Oxford. Nacido en Londres, estudió la licenciatura en matemáticas por la Universidad de Durham y obtuvo el doctorado en cosmología por la Universidad de Oxford en 1977. Después de pasar un año como becario de la Institución Lindemann en la Universidad de California en Berkeley, regresó a Oxford entrando a formar parte del departamento de astrofísica. Silk es profesor de astronomía en Berkeley. Nacido en Inglaterra, estudió matemáticas en la Universidad de Cambridge, obtuvo su doctorado en astronomía por la Universidad de Harvard y pasó posteriormente unos años en el Instituto de Astronomía de Cambridge y en la Universidad de Princeton. Silk es autor de un nuevo libro de cosmología: *The Big Bang: The Creation and Evolution of the Universe.*

MARC BEKOFF y MICHAEL C. WELLS ("Ecología social de los coyotes") trabajan en la Universidad de Colorado en Boulder. Bekoff, que enseña en Boulder desde 1974, se licenció en antropología y doctoró en comportamiento animal por la Universidad de Washington. Además de sus estudios sobre cánidos, tanto en cautividad como en la naturaleza, ha investigado el comportamiento de los pájaros bobos de Adelia del criadero de Cape Crozier, en la Antártida. Wells se graduó en la Universidad estatal de Michigan obteniendo su licenciatura y doctorado por la Universidad estatal de Colorado. Su investigación doctoral trataba de los "procesos de percepción en las aves acuáticas y los coyotes".

JAMES H. SCHWARTZ ("Transporte de sustancias en las células nerviosas") da clases de fisiología y neurología en la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia. Estudió en dicho centro superior, doctorándose luego por la Universidad Rockefeller. Siendo profesor del departamento de microbiología de la Universidad de Nueva York, inició en 1968 el estudio de la bioquímica de las células nerviosas, incorporándose al conjunto de investigadores que constituyeron la División de Neurobiología y Conducta. La División se trasladó a la Universidad de Columbia en 1974.

Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos años

Nació en Lobera (Jaén) Bernabé Cobo, uno de los estudiosos clásicos de la naturaleza americana. En 1596, cuando todavía era un adolescente, marchó a las Indias en busca de fortuna. Tres años más tarde, se matriculó en el Colegio de San Martín, de Lima, que regentaban los jesuitas. Ingresó como novicio de la Compañía de Jesús en 1601 e hizo la profesión solemne de los cuatro votos en 1622. Residió en diversas casas que los jesuitas tenían en varias zonas del Perú e hizo desde ellas numerosos viajes, lo que le permitió conocer directamente la mayor parte del virreinato. Hacia 1613, comenzó a preparar una gran *Historia del Nuevo Mundo,* al principio solamente con materiales peruanos. En 1629, sin embargo, sus superiores le autorizaron a que se trasladara a Nueva España, donde completó sus indagaciones, viajando durante trece años por México y Centroamérica. De regreso al Perú, terminó, por fin, su *Historia* en 1653, tras cuatro décadas de trabajo. El año 1657 falleció en Lima.

La gran obra de Cobo no fue impresa en su tiempo. En 1804, Antonio José Cavanilles publicó algunos fragmentos. Noventa años más tarde, Marcos Jiménez de la Espada editó completa la primera parte, que corresponde a la historia natural y a lo que hoy llamaríamos etnografía. De la segunda parte, de contenido histórico y geográfico, solamente se conservan los capítulos referentes a la fundación de Lima. Se ha perdido enteramente la tercera que, entre otras cosas, se ocupaba de las Filipinas y de la navegación a las Indias.

La primera parte de la *Historia del Nuevo Mundo* comprende catorce libros. El primero es un mero resumen de cosmografía general, de acuerdo con las doctrinas tradicionales. Mayor interés tienen el segundo y el tercero, consagrados respectivamente a la geografía física y a los minerales de América y, en especial, del Perú. Hay que destacar en ellos los capítulos sobre los climas, los volcanes y los terremotos, así como los referentes a las minas. El aspecto más sobresaliente de la obra de Cobo es, sin embargo, la botánica, tema de los libros cuarto al sexto –que tratan de las plantas propias de América– y de la mayoría del décimo, dedicado a los vegetales y animales introducidos por los españoles en el Nuevo Mundo. Cobo ofrece el primer estudio detallado de la flora del Perú, que contiene, entre otras, la primera noticia acerca de la quina o "árbol de calenturas": "En los términos de la ciudad de Loja, diócesis de Quito, nace cierta casta de árboles grandes que tienen la corteza como de canela, un poco más gruesa, y muy amarga; la cual, molida en polvo, se da a los que tienen calenturas y con sólo este remedio se quitan. Hánse de tomar estos polvos en cantidad de peso de dos reales en vino o en cualquiera otro licor poco antes que dé el frío. Son ya tan conocidos y estimados estos polvos, no sólo en todas las Indias, sino en Europa, que con instancia los envían a pedir de Roma". Cobo no se limita a un nivel puramente descriptivo, sino que intenta estudiar la flora de manera sistemática, situando en primer plano el condicionamiento ambiental. Muy amplio es también el espacio que dedica a la fauna. Los libros séptimo a noveno se ocupan de los animales propios de América y parte del décimo –como acabamos de decir– de los introducidos por la colonización española. Su capacidad de observador se refleja no sólo en los mamíferos, aves o reptiles, sino en los insectos, en general muy poco estudiados por los naturalistas anteriores. Rectifica asimismo errores de estos últimos, como el supuesto ombligo existente en el lomo del saino común, que demuestra que es una glándula secretora del humor pestilente con el que dicho animal se defiende. Anotemos, para concluir, que los cuatro últimos libros de esta parte están consagrados a los indios.

...cien años

Joaquín María de Castellarnau publicó su *Estudio micrográfico del tallo del pinsapo,* y una clave para clasificar las maderas de las coníferas por sus caracteres micrográficos, títulos iniciales de su gran obra de histólogo vegetal.

Nacido en Tarragona en 1848, Castellarnau se formó como ingeniero de montes en la Escuela de Madrid. Comenzó su carrera como ingeniero de la Casa Real y más tarde fue destinado a la comisión que debía estudiar la flora forestal del distrito de Huesca. Terminó asentándose en Segovia, donde realizó la mayor parte de su labor científica, en buena parte con la colaboración de Rafael Breñosa, director del Establecimiento de Piscicultura del Real Patrimonio de San Indelfonso y excelente cristalógrafo.

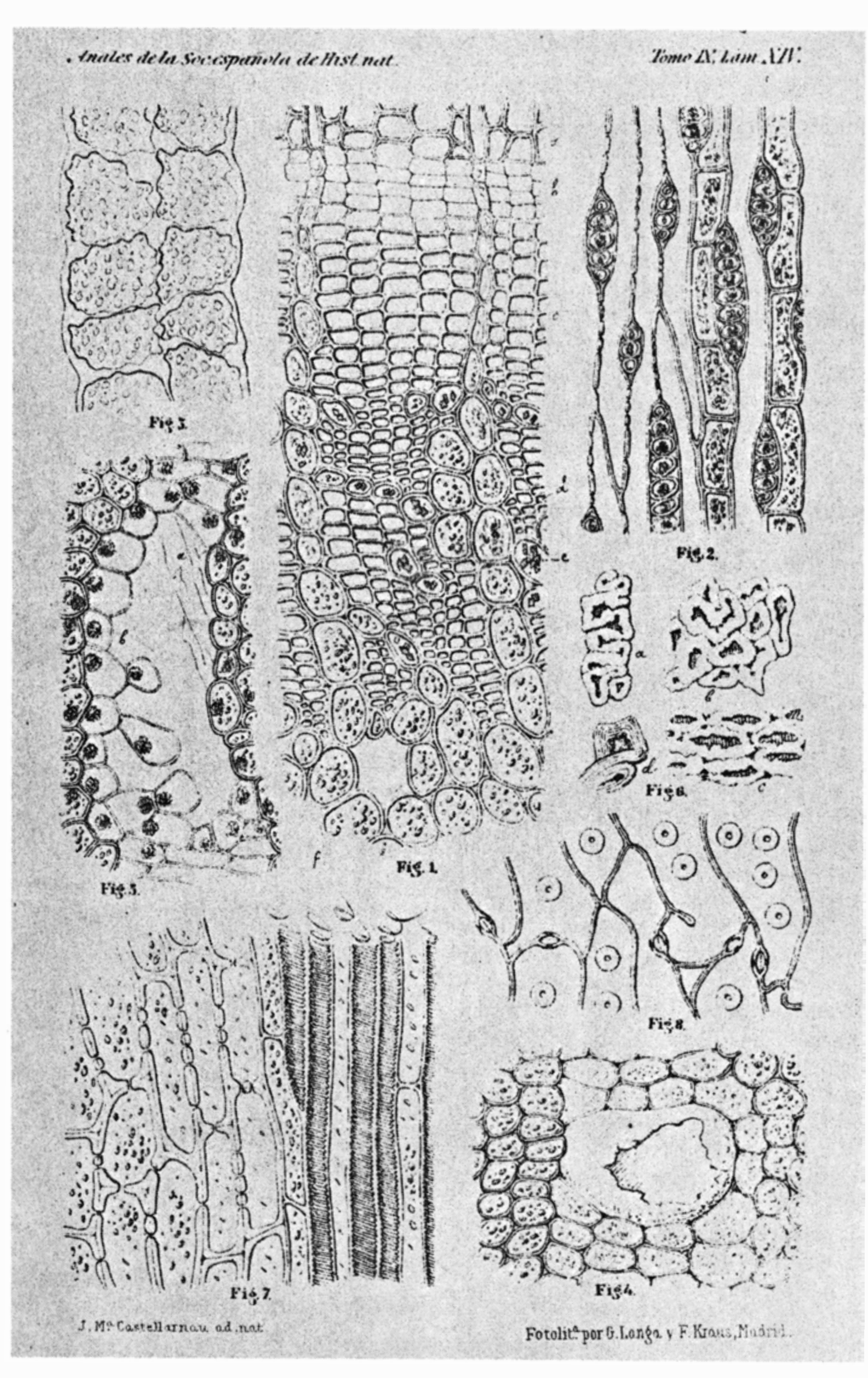
Se consagró a la investigación histológica con una intención aplicada: "Es indudable que el conocimiento micrográfico de las maderas tendría gran utilidad práctica; y, no obstante, su estudio está tan completamente descuidado que, si algo se ha hecho, ha sido únicamente bajo el punto de vista histológico y puramente científico, dejando a un lado la parte práctica y de aplicación. Considerando esto, me propuse escribir una descripción micrográfica de todas las maderas españolas que se emplean en la industria, con el fin de trazar su característica y formar una clave analítica... por medio de la cual se pudiese llegar fácilmente y con seguridad a la determinación de las especies". El trabajo inicial, dedicado como hemos dicho al pinsapo, especie arbórea típicamente española, no se limita a la descripción microscópica del tallo en su estado de completo desarrollo, sino que sigue paso a paso la marcha evolutiva de los tejidos que lo componen, partiendo de la yema. Con un laboratorio notablemente bien equipado, Castellarnau publicó a partir de entonces un gran número de estudios micrográficos. Entre ellos, solamente recordaremos los consagrados a la madera de las coníferas españolas y especialmente del género *Pinus* (1883), a la del *Quercus jordanae* de las Islas Filipinas (1885), a la del olmo y el haya (1894) y a la del abedul, el avellano y el aliso (1905), los dos últimos con espléndidos atlas en folio. Esta labor no solamente fue muy estimada a nivel internacional por los especialistas en el tema, sino que llegó a tener cierta repercusión en la misma España. Sus trabajos figuraron en la sección oficial de la Exposición Universal de Barcelona (1888), en la que obtuvo una medalla de oro.

Como consecuencia directa de estas investigaciones, Castellarnau se interesó por las frecuentes cristalizaciones intracelulares que observaba. En colaboración con Breñosa, le dedicó varios estudios, a partir del titulado *Los cristales de oxalato de calcio en las células del parénquima leñoso del "Quercus ilex"* (1884). Utilizando la luz polarizada, llegaron, en efecto, a resultados que los convencieron de que se trataba de cristales de oxalato cálcico y no de sulfato, como se había pensado. También plantearon la hipótesis de que las diferencias entre la forma de los cristales intracelulares de árboles de zonas distintas se debían a factores ambientales.

Otro aspecto de la actividad científica de Castellarnau estrechamente relacio-

nado con la investigación micrográfica fue su contribución a la paleofitología. Comenzó estudiando las maderas fósiles recogidas por el geólogo Francisco Quiroga en una expedición científica al Sahara (1889) y acabó recibiendo material, para identificar, de las más distintas procedencias.

Castellarnau se ocupó también de temas de hidrobiología y ecología. Por otra parte, tradujo del alemán los tratados de Robert Hartig sobre anatomía y fisiología vegetales y sobre fitopatología, así como la obra de histología vegetal de Arthur Meyer. Dedicó varias publicaciones a la investigación microscópica.



Una de las láminas del trabajo de Castellarnau sobre la micrografía del tallo del pinsapo: corte transversal de la región del **cambium** y **floema** *de una ramilla de seis años* **(Fig. 1)**; *corte tangencial del* **floema** *a los seis años* **(Fig. 2)**; *vasos en la zona cortical de una ramilla de un año* **(Fig. 3)**; *corte radial del parénquima de la zona cortical, presentando una vesícula glandulosa* **(Fig. 4)**; *corte radial de la región cortical de una ramilla de un año, que demuestra el origen de las vesículas glandulosas* **(Fig. 5)**; *celdillas lignificadas del* **floema (Fig. 6)**; *corte tangencial de una ramilla de un año* **(Fig. 7)** *y corte radial, en la madera de primavera, que presenta la unión de varios traqueidos* **(Fig. 8)**.

Guerra química: rearme o desarme

A menos que las actuales negociaciones de Ginebra consigan detener el desarrollo, producción y acumulación de armas químicas, una nueva y más peligrosa fase de la carrera de armamentos puede estarse iniciando

Matthew Meselson y Julian Perry Robinson

El empleo de gases venenosos y otros tipos de armas químicas en la guerra está prohibido por el Protocolo de Ginebra de 1925, del cual son actualmente signatarias todas las grandes potencias. Algunas naciones aceptan el Protocolo de Ginebra en términos de prohibición absoluta; otras, entre las que se cuentan los Estados Unidos, Inglaterra, Francia, Unión Soviética y China, lo consideran como un acuerdo que les compromete únicamente a no tomar la iniciativa en su empleo, pero reservándose el derecho de adoptar medidas de represalia en este sentido si un posible adversario violase el Protocolo. De todos los estados miembros de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN), únicamente los Estados Unidos y Francia poseen unas reservas de armas químicas importantes desde un punto de vista militar. La conservación de este tipo de ingenios bélicos está basada en su posible papel para una acción de represalia en el caso de un ataque químico por parte de la Unión Soviética.

A partir de 1976, los Estados Unidos y Rusia iniciaron una serie de conversaciones y negociaciones bilaterales en Ginebra, encaminadas a lograr un desarme químico, incluyéndose en ellas el tema de la prohibición de desarrollar, producir y acumular armas químicas. (La Convención de 1972 sobre armas biológicas ya incorpora tales prohibiciones en relación con los agentes biológicos, pero no incluye todavía las armas químicas.) Estas conversaciones bilaterales han conseguido considerables coincidencias en lo relativo a lo que debe ser objeto de prohibición, así como sobre el principio general de incorporar normas y disposiciones, tanto de carácter nacional como internacional, que puedan ayudar a la verificación de su cumplimiento. No obstante, se ha conseguido adelantar muy poco en el terreno de algún posible acuerdo sobre la aplicación de medidas o disposiciones concretas de tales verificaciones.

Mientras continúan las conversaciones bilaterales entre Estados Unidos y la Unión Soviética, y simultáneamente se desarrollan otras dentro del multilateral conjunto del Comité de Desarme, que igualmente tiene en Ginebra su sede de reunión, Norteamérica y sus aliados de la OTAN han iniciado un importante programa encaminado a mejorar y modernizar la protección de sus fuerzas ante un eventual ataque químico. Estas medidas defensivas han encontrado un amplio eco y un apoyo incondicional entre los gobiernos de los países de la OTAN, que las contemplan no sólo como unas medidas precautorias muy importantes en la presente situación, sino también como una garantía aun en el caso de que la prohibición de las armas químicas llegara a convertirse en realidad.

Aunque los Estados Unidos han perfeccionado considerablemente las medidas de protección contras las armas químicas, no han aumentado sin embargo sus reservas de este tipo de armamento desde el año 1969. Las reservas norteamericanas, aunque notables, se encuentran acumuladas casi en su totalidad en el interior de su territorio. Su posible utilidad como fuerza de represalia queda limitada y sujeta al considerable esfuerzo logístico que resultaría necesario para su despliegue en Europa en condiciones de empleo y también por la repugnancia que mostrarían los países de la OTAN para integrar las armas químicas en las estructuras de su organización militar y en el planeamiento defensivo de la Alianza. Las peticiones de las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos en solicitud de créditos para la construcción de las instalaciones necesarias a fin de producir una nueva generación de proyectiles de artillería con carga de gas venenoso —denominada munición binaria— han sido rechazadas por el Congreso y la Administración bajo la justificación, en parte, de que una acción de tal naturaleza podría poner en peligro las negociaciones en vigor encaminadas a conseguir la firma de un tratado sobre limitación de armas químicas. Por otra parte, no existe acuerdo sobre el verdadero valor militar de una capacidad de represalia química y sobre sus posibles conexiones con el problema de la disuasión nuclear.

En resumen, la política estadounidense en relación con las armas químicas parece encontrarse actualmente casi ante una encrucijada. Si se logra culminar un tratado satisfactorio, se producirá el desarme químico. De otra forma, Norteamérica puede verse obligada a adoptar la decisión de impulsar la producción de nuevas armas químicas y de esforzarse en persuadir a la OTAN para integrarse en su planeamiento defensivo. En este artículo vamos a tratar algunas de las consideraciones de carácter técnico, militar y político que influyen más directamente en las posibles alternativas al alcance de los



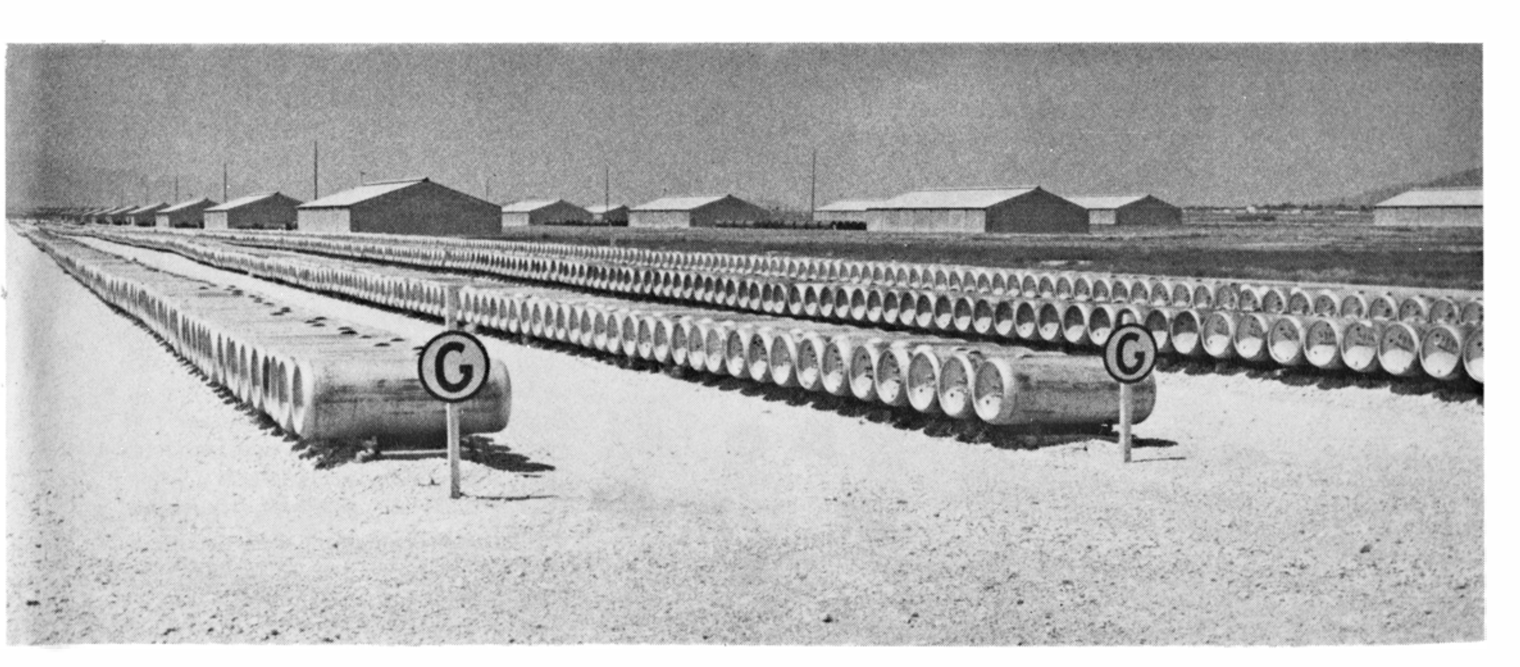
GAS NERVIOSO, almacenado en forma líquida en contenedores metálicos en los Depósitos del Ejército situados en Tooele (estado de Utah). Estos contenedores tienen una capacidad de un total de cerca de 3.785.000 litros del agente GB o

Estados Unidos y sus aliados. En un contexto internacional más amplio existen otros factores relacionados con este mismo asunto y que pueden resultar no menos importantes, pero sobre los que no se va a tratar en esta ocasión.

Las armas químicas modernas están basadas en compuestos orgánicos de fósforo conocidos con el nombre de gases nerviosos o agentes nerviosos. Estos compuestos están relacionados químicamente con cierto tipo de pesticidas, pero tienen un grado de toxicidad mucho más elevado. El primero de estos compuestos, denominado tabun, fue descubierto en Alemania el año 1936 en el curso de una investigación sobre insecticidas. Muy pronto fueron advertidas sus posibilidades militares por el gobierno alemán, y comenzó a producirse de forma secreta y a ponerse en desarrollo métodos de fabricación de un agente relacionado con el anterior —descubierto en 1938—, llamado sarin. Aunque en la Primera Guerra Mundial las armas químicas fueron empleadas de una forma generalizada, los beligerantes europeos de la Segunda Guerra Mundial lograron mantenerse al margen de este tipo de armas. Los gases nerviosos, en particular, no han sido nunca empleados en el combate.

Los gases nerviosos se almacenan en forma líquida. Según el grado de volatilidad de cada agente en particular, pueden ser liberados de las municiones que los contienen, bien en forma de nube gaseosa, o bien en forma de spray compuesto de pequeñas gotitas líquidas, y esparcido por procedimientos explosivos, mecánicos o térmicos. Estos productos pueden penetrar en el cuerpo humano por inhalación o por absorción a través de la piel. Así, el gas nervioso ejerce su efecto letal al unirse con el enzima acetilcolinesterasa para inactivarlo. El bloqueo de este enzima produce la rápida acumulación de la sustancia transmisora sináptica denominada acetilcolina, la cual se descompone generalmente, por acción de la acetilcolinesterasa, en fracciones de segundo, después de ser liberada en los centros nerviosos. La concentración de la acetilcolina en los ganglios y centros autónomos, en las uniones neuromusculares del esqueleto y en las sinapsis del sistema nervioso central, produce una gran variedad de síntomas: sudor copioso, atascamiento de los conductos bronquiales a causa de mucosidades, estrangulamiento bronquial, pérdida de visión, vómitos y diarreas incontrolables, convulsiones y finalmente parálisis y fallos respiratorios. La muerte a consecuencia de un envenenamiento agudo por gas nervioso se produce por asfixia, y ocurre en pocos minutos. No obstante, si la dosis es sólo parcialmente letal, o si se recibe a través de la piel, puede tardar varias horas en provocar la muerte de la víctima. Hay datos que, a consecuencia de exposiciones ante dosis no letales, pueden presentarse desórdenes y síntomas de carácter neurológico y psiquiátrico. El proceso de desintoxicación natural ante un envenenamiento por gas nervioso es lento, tanto si la dosis se recibe toda de una vez, como si se sufre a lo largo de un periodo de varias horas. Existen antídotos de eficacia limitada, pero una defensa mucho más eficaz contra los gases nerviosos (y por supuesto contra toda clase de agentes de guerra química) es la proporcionada por las máscaras contra gases y por un ropaje protector adecuado contra los agentes que ejercen su efecto penetrando a través de la piel o atacándola.

De los cientos de anticolinesterasas organofosforadas que han sido experimentadas para su empleo en este tipo de armas, hay tres que ocupan una posición destacada. Sus nombres químicos son: Orto-isopropil metilfosfonofluorhidrato (también conocido como agente GB, o sarin), Orto-1,2,2-trimetilpropilmetilfosfonofluorhidrato (agente GD, o soman) y Orto-etil-*S*-2-diisopropil-aminoetil metilfosfonotiolato (agente VX). Se estima que alrededor de un miligramo de sarin, o 0,4 miligramos de VX, constituye una dosis media letal para un hombre; la dosis letal del soman se halla a caballo entre las anteriores. El sarin, casi tan volátil como el agua, despliega una gran eficacia como contaminante del aire. El agente VX, con un grado de volatilidad próximo al de los aceites pesados para lubricación, debe ser diseminado mediante pulverizadores, bien buscando el contacto directo, o bien en forma indirecta a través de la contaminación del suelo o de otras superficies con las que el personal objeto del ataque haya de tomar contacto posteriormente. La aplicación del agente VX en la proporción de 300 kilógramos por kilómetro cuadrado crearía unas



sarin, que es un compuesto organofosforado de alta toxicidad, relacionado químicamente con determinados pesticidas. La dosis letal de sarin para un ser humano adulto es de aproximadamente un miligramo. Los edificios que se observan al fondo almacenan reservas adicionales en forma de municiones con carga de gases. Los objetos apilados entre los distintos almacenes son tanques de pulverización de unos 600 litros transportables por aviación, que contienen otro tipo de gas nervioso, el agente VX. Aproximadamente el 40 por ciento de la totalidad de las reservas norteamericanas de gases venenosos, incluyendo tanto el gas nervioso como el gas mostaza, se almacenan en este lugar y en otros pertenecientes a los Depósitos de Tooele.

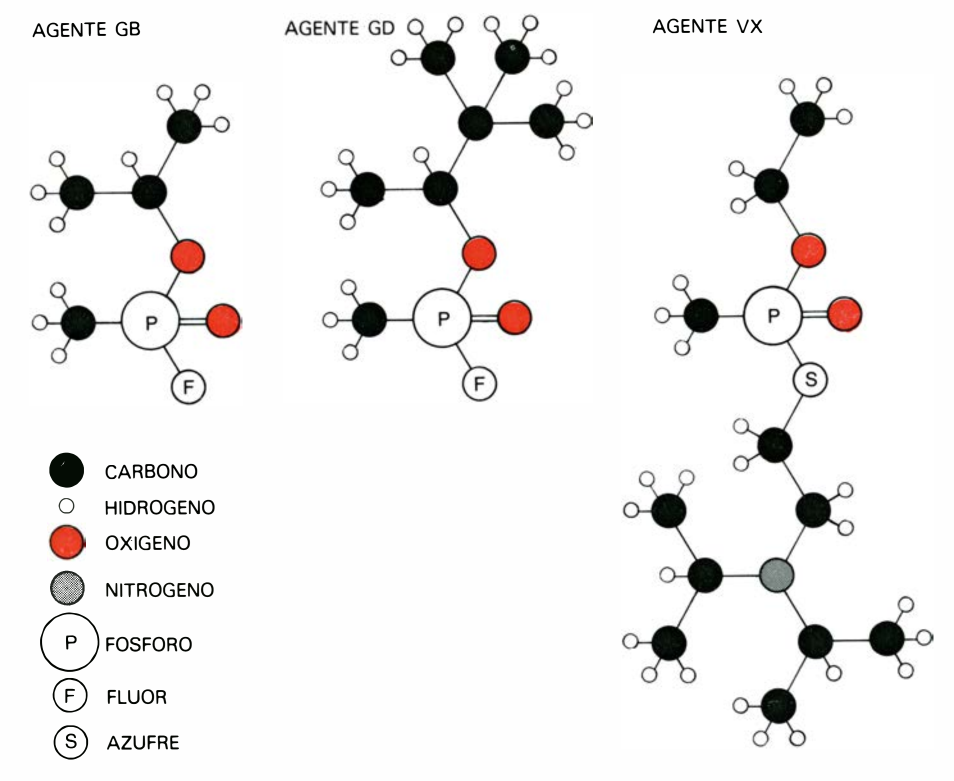
condiciones mortales por contacto cutáneo, que mantendrían una persistencia de días e incluso semanas, según las condiciones atmosféricas. Los riesgos producidos por el sarin, agente fundamentalmente aéreo, son de una duración mucho más corta y dependen en gran manera de las corrientes de aire —verticales u horizontales— y de la temperatura del ambiente; en la mayoría de los casos, la cantidad necesaria para provocar una dosis respiratoria letal oscila entre los 100 y los 3000 kilogramos por kilómetro cuadrado.

El sarin y el VX son los dos gases nerviosos tipo en los Estados Unidos. El soman, preparado inicialmente en Alemania en 1944, está considerado por las potencias occidentales como la clase de gas nervioso que posee la Unión Soviética. La volatilidad del soman es parecida a la del sarin, pero puede obtenerse una mayor persistencia aumentando su densidad con el empleo de polímeros sintéticos. Lo que los rusos denominan VR-55 se cree que es un producto con una formulación polimérica de este tipo. El tabun (Ortoetil N,N-dimetil fosforoamidocianuro, también conocido como GA), es el primitivo gas nervioso, aunque ha sido reemplazado en la actualidad; hace tiempo se le consideró uno de los tipos de gas nervioso de mayor importancia en los arsenales químicos soviéticos; si ello resultase cierto, dichas reservas podrían seguir existiendo actualmente.

Ningún otro compuesto venenoso puede igualarse a los gases nerviosos para su empleo en el combate. Su gran toxicidad y rapidez de acción, su eficacia —tanto a través de la piel como del sistema respiratorio—, su facilidad de diseminación, su coste más bien bajo y su elevada estabilidad les coloca muy por encima de cualquier otro agresivo empleado en la guerra química. Los anteriores agentes pueden considerarse obsoletos hoy día para los países industrializados, aunque algunos tipos puedan aún ser tenidos en cuenta, sobre todo porque todavía se cuente con reservas importantes. El ácido cianhídrico es un ejemplo; el *bis* (2-cloroetil) sulfuro, conocido igualmente con el nombre de gas de mostaza, es otro.

Los gases nerviosos han eclipsado también a la familia de los gases paralizantes, es decir, aquellas sustancias orientadas a dejar a los combatientes fuera de acción por un período de varias horas o incluso días, pero con muy escasa probabilidad de ocasionar la muerte, ni siquiera mantener unos efectos o consecuencias duraderas de enfermedad. Aunque se ha experimentado con muchos tipos de posibles sustancias paralizantes, ninguna ha dado resultados satisfactorios. La droga psicotrópica anticolinérgica, conocida como el agente BZ (3-quinuclidinil benzilato), fue incluida por los Estados Unidos durante algún tiempo entre sus municiones de tipo paralizante, pero sus muchas deficiencias desde el punto de vista militar, entre las que cabe resaltar su tendencia incontrolable a provocar un comportamiento maníaco, aconsejaron su abandono. Las únicas armas contra personal, no letales, actualmente en los inventarios de armamento químico de Estados Unidos, son las que se basan en los agentes irritantes CS (ortocloro-benzilendeno-malononitrilo) y CR (dibenzen [*bf*] [1,4] oxazepina). La policía también los utiliza y están considerados como un tipo de armas antidisturbios de gran eficacia. Aunque los Estados Unidos hicieron un uso muy amplio de municiones CS en la guerra del Vietnam, e interpretan el Protocolo de Ginebra como no aplicable a los agentes antidisturbios, sus efectos resultan casi por completo irrelevantes en un combate entre fuerzas militares modernas, a causa de la brevedad de sus efectos y la protección ofrecida por las máscaras antigases.

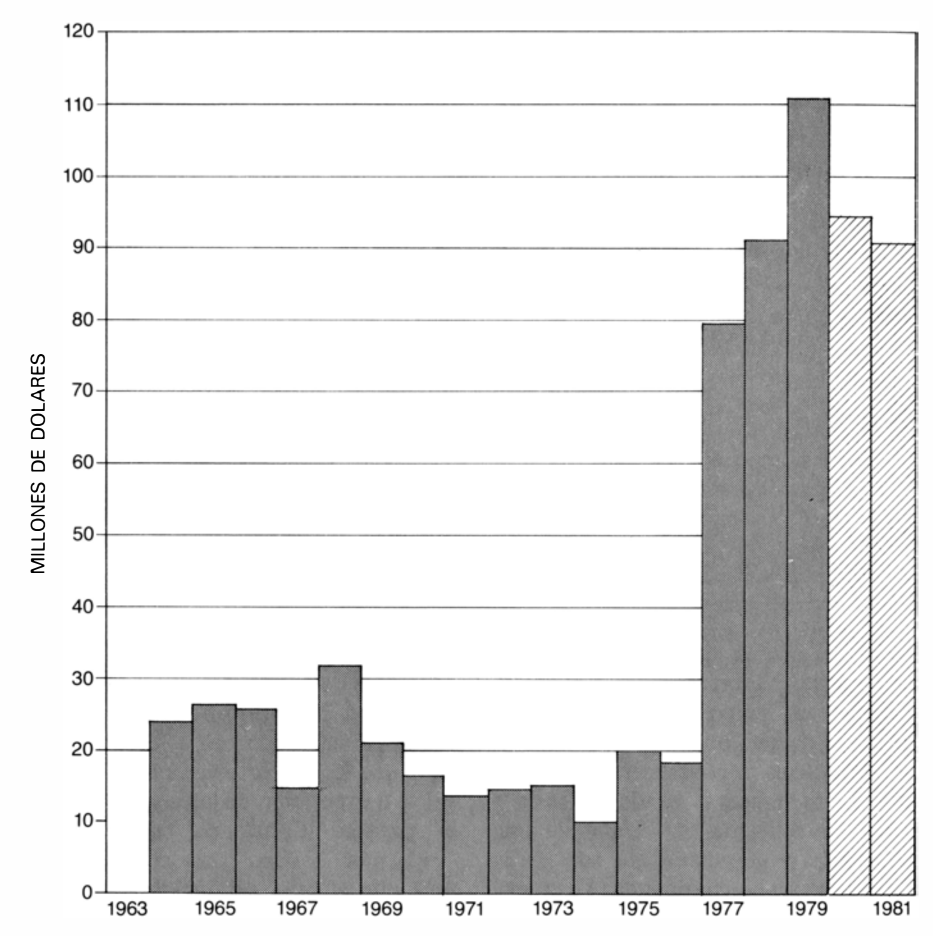
El volumen de las reservas norteamericanas de municiones químicas de efectos mortales constituye un tema de información reservada, aunque pueden establecerse algunas hipótesis en base a datos procedentes de fuentes de información pública. En el período comprendido entre 1953 y 1957 se produjeron aproximadamente 15.000 toneladas de sarin y entre 1961 y 1963 se fabricaron alrededor de 5000 toneladas de VX. Cerca de 5000 toneladas de gas nervioso, en especial sarin, han sido contabilizadas como consecuencia de la destrucción de lotes de munición caducada y de excesos en las reservas. De las restantes, alrededor de una cuarta parte está almacenada a granel en contenedores y las otras tres cuartas partes en municiones. A lo largo de los treinta últimos años se han aprobado, para ser incluidas en los inventarios operativos del Ejército de los Estados Unidos, aproximadamente treinta tipos diferentes de municiones a base de gas nervioso, de las cuales por lo menos una mitad ha sido objeto de fabricación masiva. Algunos de ellos se encuentran desechados actualmente y se están destruyendo o van a serlo. El resto de las reservas existentes alcanza la cifra aproximada de tres millones de proyectiles de artillería (granadas GB de 105 milímetros, proyectiles GB y VX de 155 milímetros y munición GB y VX de 8 pulgadas), varios millares de bombas GB de aviación de 500 y 750 libras (una libra equivale a



ESTRUCTURAS QUIMICAS de los tres tipos de anticolinesterasas organofosforadas, o gases nerviosos, que existen actualmente en los arsenales norteamericanos y soviéticos mostradas en estos diagramas moleculares. Leyendo de izquierda a derecha, los compuestos son los siguientes: Orto-isopropil metilfosfonofluorhidrato (agente GB), Orto 1,2,2-trimetilpropil metilfosfonofluorhidrato (agente GD, o soman) y Ortoetil *S*-2-diisopropilaminoetil metilfosfonotiolato (agente VX). Los agentes GB y VX son los dos tipos estándar de gas nervioso de los Estados Unidos. Se cree que el agente GD es el tipo ruso.

0,454 kilogramos), cientos de miles de minas terrestres VX de dos galones (un galón americano equivale a 3,785 litros) y alrededor de 1500 tanques de spray aéreo VX de 160 galones. También se mantienen existencias de gas de mostaza, procedente de la Segunda Guerra Mundial, tanto en forma de municiones, como a granel, en unas cantidades aproximadamente iguales a las de gas nervioso. Las reservas almacenadas de municiones letales de tipo químico totalizan casi las 150.000 toneladas, cifra referida al peso de las municiones en sí mismas y no al del agente químico que contienen. De este total, dos terceras partes corresponden a las municiones del tipo de gas nervioso.

El tonelaje total que alcanzan las disponibilidades de municiones químicas letales de los Estados Unidos representa alrededor de la cuarta parte de las cantidades totales de municiones de tipo convencional (de alto explosivo) que el Ejército norteamericano posee en Europa. Sin embargo, sólo una pequeña fracción de estas reservas de armas químicas ha sido situada fuera de los límites de su territorio nacional: en la isla Johnston, del Pacífico medio, y en Alemania Occidental. Las existencias en Alemania Federal, bajo el control exclusivo de los Estados Unidos, están constituidas casi en su totalidad por municiones terrestres; se dice que únicamente resultarían suficientes para dos semanas de operaciones en el supuesto de una guerra química generalizada en Europa.



GASTOS EFECTUADOS POR LOS ESTADOS UNIDOS en equipos protectores contra un ataque químico. Tales gastos han sufrido un gran incremento en los últimos años, debido a que este país y sus aliados de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) están intentando mejorar la capacidad de sus fuerzas instaladas en Europa en lo referente a las medidas de guerra antigás. Las columnas oscuras de la ilustración están medidas en dólares del valor de 1973 (*ordenadas*). Las dos columnas rayadas indican los presupuestos aproximados de gastos para los años que se citan.

Si se logra la autorización de la Administración y del Congreso de los Estados Unidos, la próxima aportación al conjunto de armas químicas norteamericanas será quizás el proyectil binario de artillería GB de 155 milímetros. En vez de contener el actual gas nervioso en la forma usual, dispone de dos iniciadores de dicho gas alojados en cápsulas independientes. Cuando se dispara el proyectil, las cápsulas estallan y su contenido reacciona para formar el gas nervioso, propiamente dicho, mientras el proyectil se encuentra en plena trayectoria. Una de estas cápsulas puede ser almacenada y transportada por separado e introducida en el proyectil en el propio asentamiento del arma. Este dispositivo de seguridad incorporado a las municiones binarias de gas nervioso ha sido diseñado con objeto de conseguir una mayor flexibilidad operativa en las fases de almacenamiento, transporte y despliegue de las armas químicas, contribuyendo por otra parte a aliviar la gran preocupación pública ante el posible peligro de una fuga inintencionada de gas nervioso.

Se dispone de muy escasa información, fuera de la Unión Soviética, acerca del armamento químico de este país, tanto desde un punto de vista cuantitativo como cualitativo. Los rusos nunca han hecho manifestaciones públicas al respecto. Las estimaciones realizadas acerca del volumen de las reservas soviéticas se basan más en la apreciación de sus presumibles necesidades militares que en sólidas pruebas. Los especialistas norteamericanos en asuntos de la defensa han manifestado que merecen muy poca fiabilidad las estimaciones actuales acerca del volumen total de las reservas rusas, pero que, en cualquier caso, una gran parte de las mismas estaría desplegada tanto en las zonas europeas de vanguardia, como en las proximidades de la frontera con China. Se considera que una parte de estas reservas está constituida por municiones de gas nervioso y el resto principalmente por gas de mostaza y ácido cianhídrico.

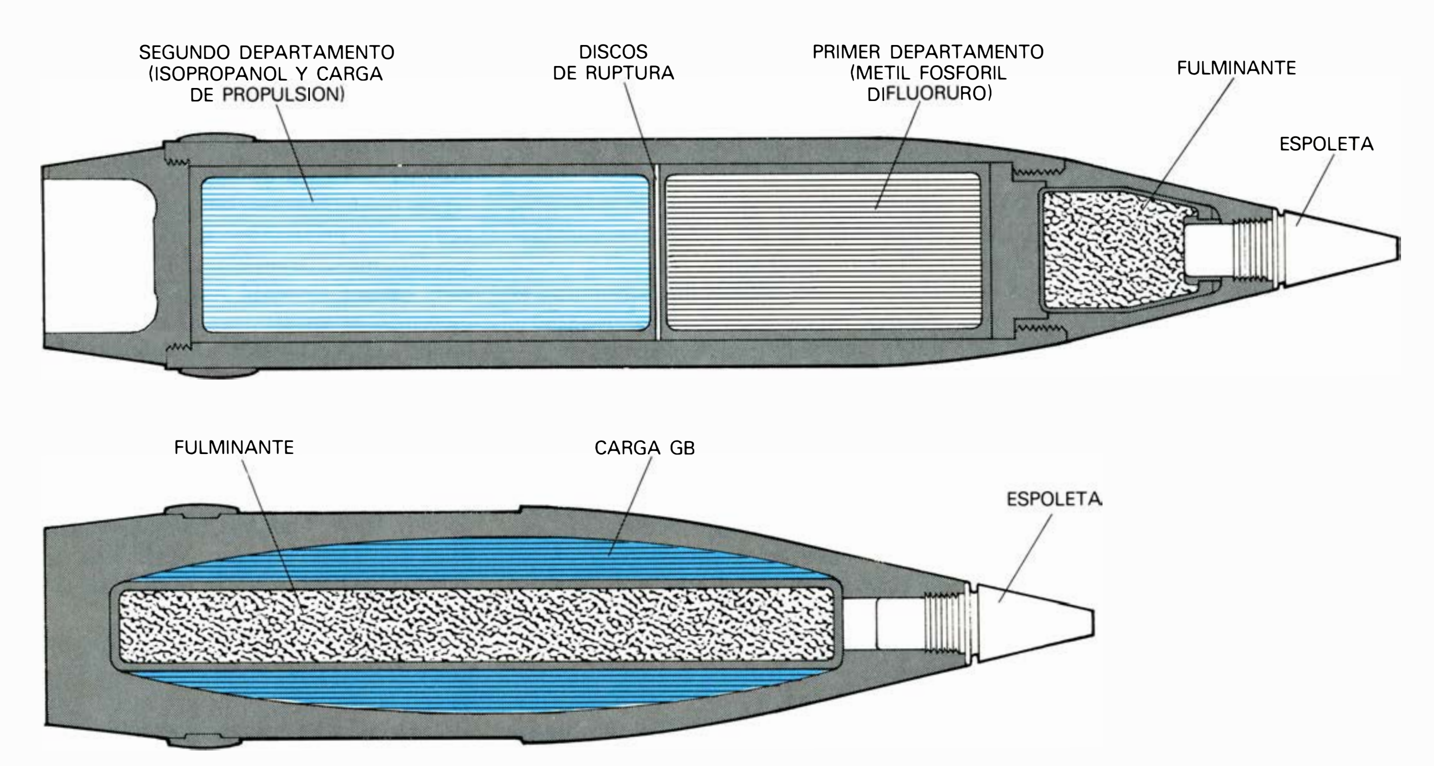
Se desconoce si, para los rusos, estas disponibilidades de municiones implican exclusivamente un posible medio de represalia, al igual que ocurre con los norteamericanos. Se dijo que los soviéticos habían incrementado considerablemente durante la década de los años 60 sus reservas tanto en armas químicas como en equipos de protección. Si ello es cierto, este fenómeno debió coincidir con las fechas en que tuvieron lugar los últimos incrementos en el armamento químico de los Estados Unidos. De acuerdo con la declaración de propósitos y proyectos militares hecha en 1979 por el Presidente de la Junta de Jefes de Estado Mayor norteamericano, la orden ejecutiva para desarrollar y poner en marcha los medios disponibles para una guerra química por parte soviética ha de emanar del Politburó: el más alto órgano del estado soviético.

Resulta posible conseguir –en un grado inalcanzable contra cualquier otra categoría de armas– una protección ante los efectos de las armas químicas sin que, al propio tiempo, resulte necesario suspender la mayor parte de las actividades normales. En esta característica peculiar se basan algunos aspectos destacados de la política de defensa contra este tipo de armas. La primera y más importante línea de defensa contra los agentes de una guerra química (también

necesaria, en parte, ante la lluvia radiactiva) está constituida por la protección física proporcionada por los respiradores, las prendas especiales protectoras y los filtros de aire instalados en los refugios colectivos. Las máscaras antigás, adecuadamente acopladas, son capaces de reducir la dosis de concentración de los agresivos químicos del aire inspirado hasta por lo menos una cienmilésima parte. Los filtros contienen carbón activado, para dificultar la absorción gaseosa, y papel poroso o cualquier otra sustancia, para retener las partículas. A fin de aumentar la protección contra los agentes constituidos por moléculas de pequeño tamaño, tales como el ácido cianhídrico, el carbón está impregnado de compuestos de cobre o de otros reactivos. Las máscaras antigás, actualmente de dotación en la OTAN, pueden acoplarse en menos de diez segundos y mantenerse puestas después por largos periodos de tiempo, e incluso durante las horas de sueño. La tensión psicológica producida a consecuencia del empleo de las máscaras resulta mínima y puede ser mitigada por medio de una instrucción y entrenamiento adecuados y por la práctica continuada. La nueva máscara norteamericana, en estado avanzado de desarrollo, incorpora diversos refinamientos sobre la ahora reglamentaria. Es más ligera y está diseñada para poderse combinar mejor con los equipos ópticos y auditivos. La actual máscara rusa, de acoplamiento más difícil y lento que las de la OTAN, resulta más pesada y menos confortable.

Todas las fuerzas del Ejército de los Estados Unidos en Europa están equipadas con el equipo protector inglés Mark 3, o con el recientemente distribuido equipo americano similar al anterior. Cada equipo está constituido por una prenda de dos piezas y para lograr una protección completa va complementado con guantes y sobrebotas de gomabutilo. El equipo americano pesa 1,8 kilogramos y es hidrófugo aunque permeable al aire. De las dos capas que lo componen, la exterior es muy resistente al desgaste por el uso y ha sido tratada para poderse humedecer con rapidez por las gotitas de gas nervioso, con objeto de acelerar su evaporación. El vapor penetrante es adsorbido por el carbón activado que forma parte de la superficie no sujeta a exposición de la capa interior de la prenda. Como el tejido puede "transpirar" y dejar pasar el sudor, permite que el calor producido al usuario por el empleo de esta prenda le ocasione unas molestias apenas superiores a las del ropaje normal. A las temperaturas habituales en Centroeuropa, la disminución de la capacidad de combate a causa del calor producido por el empleo de la totalidad de este equipo protector resulta mínima. Sin embargo, a temperaturas superiores a los 24 o 27 grados centígrados, los periodos de actividad intensa deben limitarse a un máximo de una hora o en caso contrario, si existe la necesidad de que sean de mayor duración, será preciso adoptar alguna medida parcial de alivio, como por ejemplo desprenderse de los guantes por un tiempo limitado, o desabrochar la parte delantera de la chaqueta protectora. Las actuales prendas de protección soviéticas están constituidas por tejido de caucho impermeable al aire. A 16 grados centígrados pueden utilizarse a lo largo de un intervalo ininterrumpido de unas cuatro horas antes de que la tensión producida por el calor alcance unos límites capaces de producir bajas; alrededor de los 21 grados, el tiempo de tolerancia es inferior a la media hora continuada. Al parecer, los rusos están elaborando un modelo más perfeccionado.

En los vehículos acorazados de combate es preferible contar con protección colectiva en vez de individual. Los más recientes modelos de carro de combate de la Unión Soviética y de los países europeos de la OTAN están equipados con



MUNICIONES DE ARTILLERIA diseñadas para el lanzamiento del gas nervioso GB por diversos procedimientos, representadas aquí en sendas secciones longitudinales de los proyectiles. En la parte superior de la figura se dibuja un proyectil de 155 milímetros actualmente el más moderno tipo de munición binaria ya disponible, aunque todavía no se ha autorizado su producción. En la parte baja de la figura viene representado su equivalente no binario. En la versión binaria, uno de los dos departamentos o cápsulas que contienen los ingredientes que han de formar el GB puede ser almacenado y transportado por separado, para acoplarse al proyectil en el mismo lugar de lanzamiento. Cuando se produce el disparo, los contenidos de ambas cápsulas se mezclan y reaccionan para producir el agente letal. Este sistema binario proporciona una gran seguridad contra fugas inintencionadas de gas nervioso y facilita igualmente su manejo. La mayor pesadez del revestimiento y de la carga del detonador del proyectil no binario producen unos efectos de fragmentación sustanciales. Aunque el proyectil binario contiene mayor cantidad de sustancia química, únicamente un 70 por ciento de su carga se convierte en GB; el otro producto que aparece como consecuencia de la reacción es ácido fluorhídrico. (Dibujo de Adolph E. Brotman.)

	Granadas no químicas		Granadas de gas nervioso (GB)			
	Granadas de munición de fragmentación	Granadas de explosión en el aire de alto explosivo	Objetivo de personal no protegido	Objetivo de personal dotado con máscara antigás pero sin acoplar al comienzo del ataque	Objetivo de personal con la máscara antigás acoplada, pero sin ropaje protector	Objetivo de personal llevando máscara antigás acoplada y ropaje protector
Objetivo: personal en situación ofensiva	1	4	1	2	74	(El nivel de bajas que supere un tanto por ciento mínimo resultaría inalcanzable)
Objetivo: personal en situación defensiva	4	51	1	66	74	

NUMERO DE ANDANADAS estimado de los diferentes tipos de proyectiles que deberían ser disparados por un Grupo de Artillería de 18 obuses de 155 milímetros para producir una cantidad de bajas de alrededor del 30 por ciento en un objetivo tipo Sección (con un radio de unos 150 metros), en terreno al descubierto y a una distancia de unos 10 kilómetros. Las cifras resultantes tienen en cuenta la diferencia entre el ataque y la defensa, así como el tiempo necesario –en el que estarían respirando aire contaminado– para acoplarse sus máscaras antigás, a partir del momento en que las granadas comenzasen a estallar. Los fragmentos de la metralla, de un nuevo tipo de municiones denominadas por el Ejército de los Estados Unidos Municiones Convencionales Mejoradas (ICM, del inglés "Improved Conventional Munitions"), explosionan a una altura de alrededor de 50 metros, dejando caer un conjunto de 88 bombas antipersonal de tamaño pequeño. Por lo que se refiere a los proyectiles con carga de gas nervioso, el número de andanadas necesarias podrá oscilar por menos en un orden de magnitud, de acuerdo con las condiciones climatológicas reinantes en ese momento. Las cifras que se indican tienen un valor medio: corresponden a un día con temperatura fresca, tiempo seco, nublado y con ligera brisa.

cierres herméticos y equipados de filtraje del aire a presión, de forma que las tripulaciones están protegidas por completo sin necesidad de utilizar máscaras individuales. Las fuerzas soviéticas, al parecer, están adoptando cada vez más este sistema en sus vehículos acorazados de transporte de personal y vehículos de combate que sus soldados pueden utilizar durante la batalla. Los americanos muestran preferencia por dotar a sus vehículos acorazados con un sistema central para el filtraje del aire a presión, al cual se conectan o pueden conectarse los respiradores individuales, permitiendo actuar con las escotillas abiertas y facilitando así la entrada y salida del personal de los vehículos; la protección colectiva completa está reservada para determinados tipos de vehículo, como los de mando, control y transmisiones y también para algunas unidades móviles de misiles. En ambos bandos existen también medios de protección colectiva para determinadas clases de instalaciones fijas, entre las que se incluyen los puestos de mando y ciertas instalaciones temporales en que las diversas Unidades de primera línea van pasando –estableciendo una rotación– para asistencia sanitaria y descanso.

Las tropas de la OTAN reciben como parte de su instrucción enseñanzas sobre la forma de acoplarse las máscaras y otros equipos protectores a la orden de sus jefes respectivos, ante las señales de alarma transmitidas por personal de vigilancia por un ataque con agresivos químicos, o también como consecuencia de detección individual del ataque por diversos procedimientos, entre los que figura el conocimiento de los síntomas característicos: fluidez mucosa, pérdida de visión y rigidez pectoral. La determinación del grado de protección a adoptar en cada caso se intenta conseguir y perfeccionar por medio del despliegue de sistemas de alarma automática ante ataques con gases nerviosos. Estos sistemas de alarma son muy importantes ya que la contaminación por gas nervioso a niveles capaces de producir bajas puede resultar indetectable para los sentidos humanos. Uno de los más recientes procedimientos de alarma puestos en funcionamiento está constituido por un mecanismo británico, de unos 14 kilogramos de peso, que vigila el voltaje a través de una célula electroquímica, en la cual la colinesterasa covalentemente inmovilizada es irrigada con un sustrato de solución de butiriltiocolina de una forma continuada; el gas nervioso contenido en la muestra de aire produce la inhibición del enzima, tal como lo haría en el cuerpo humano, formándose una gota al nivel de la tiocolina, que dispara el mecanismo de alarma.

Las máscaras antigás y las prendas protectoras pueden proporcionar una defensa eficaz contra los efectos del gas nervioso. En el caso de que su eficacia logre ser burlada y evitada, existe una segunda línea de defensa a disposición del individuo: la autoadministración de antídotos. La administración de antídotos debe entrar en funcionamiento cuando el equipo protector no ha podido acoplarse con la suficiente antelación, o cuando ha resultado dañado. También puede resultar necesario en la eventualidad, más remota, de que la capacidad de absorción de los filtros respiratorios o las prendas protectoras hayan alcanzado el grado de saturación en circunstancias tales que no permitan su recambio inmediato. El antídoto más fácilmente accesible es la atropina, que bloquea a la acetilcolina en unos receptores autónomos, empleada en combinación con un compuesto oxima que puede desplazar el gas nervioso procedente de la acetilcolinesterasa objeto de inhibición. Se dispone de autoinyectores para ser administrados tan pronto como comienzan a sentirse los primeros síntomas de envenenamiento por gas nervioso. La formulación empleada en los actuales autoinyectores norteamericanos y rusos –conocida con el nombre de TAB– consiste en trimedoxima, atropina y un segundo antagonista de la acetilcolina, la benactizina. Este antídoto puede salvar las vidas del personal que haya recibido algo más de la dosis media letal de gas nervioso y puede igualmente reducir la gravedad de los síntomas consecuentes a dosis inferiores a la dosis letal.

Las intoxicaciones más graves, hasta alcanzar varias veces la dosis media letal, únicamente pueden ser combatidas si se aplica al mismo tiempo un tratamiento eficaz de respiración artificial. El empleo profiláctico de oximas, o inhibidores reversibles de la acetilcolinesterasa, tales como la piridostigmina (administrada en forma de píldoras que deben tragarse muy poco tiempo antes de someterse a una presunta exposición al gas nervioso), pueden ayudar a perfeccionar la prognosis. A pesar de los adelantos que parecen haberse logrado en la terapia y en la profilaxis, resulta dudoso que todas estas medidas de defensa sanitarias puedan llegar a reducir de una manera significativa el número de bajas, entendiendo por ello los soldados fuera de combate, aunque puedan realmente salvar vidas humanas y ayudar a mantener la moral.

El tercer componente principal en la protección química comprende el equipo de descontaminación y los procedimientos para realizarla. Los soldados son dotados con equipos aptos para lograr la descontaminación cutánea y de los equipos individuales. Resulta igualmente importante que todos los materiales necesarios para el combate y para el apoyo del mismo se mantengan en condiciones



EQUIPO PROTECTOR diseñado para defender a los soldados frente a un ataque químico. En esta fotografía, recientemente difundida por el Ejército de los Estados Unidos, vemos a uno de sus miembros vistiendo el citado equipo. La máscara antigás, de un nuevo diseño ya en avanzado estado de desarrollo, incorpora filtros constituidos por carbón vegetal activado para la adsorción de vapor y por fibra de vidrio para la retención de las partículas. El traje protector, fabricado de dos piezas y con múltiples capas de distintos materiales, es de poco peso, hidrófugo y permeable al aire. Su capa más exterior está tratada químicamente para que se humedezca con rapidez por las gotitas de gas nervioso, a fin de acelerar su evaporación. El vapor que penetra es adsorbido por un estrato de carbón vegetal activado que está unido a la capa interna. Para una total protección el traje se complementa con guantes y sobrebotas de goma-butilo. Se colocan cintas adhesivas de papel de detección en el brazo, muñeca y tobillo. Todas las tropas de los Estados Unidos destacadas en Europa están equipadas con máscara antigás y traje protector. En los campos militares de la OTAN se realizan de forma habitual ejercicios y maniobras con todo el personal vestido y equipado con las prendas protectoras adecuadas.

de ser utilizados. La contaminación contra la que es preciso luchar es aquella que por su densidad o localización pudiera poner en peligro la protección lograda por el personal, o pudiese invadir determinadas áreas vitales. La tarea de descontaminación puede ser realizada con medios portátiles para la aplicación de productos adecuados descontaminadores en los pomos de las puertas, cerraduras, aparatos de puntería, aparatos de control de armamento, maquinaria, etcétera. Existen diversos productos descontaminadores de gran eficacia en forma de agentes oxidantes, como pueden ser los polvos de blanquear. También se dispone de potentes equipos de descontaminación para ser empleados en centros logísticos y zonas de estacionamiento. Las naciones del Pacto de Varsovia disponen de un gran número de vehículos equipados para poder realizar trabajos de descontaminación química y radiológica, entre los que figura un ingenio de gran volumen, que fue observado por vez primera durante la década de 1960, denominado TMS-65 y propulsado por turboinyección, del cual se dice que es capaz, empleado por parejas, de lograr la descontaminación de las superficies exteriores de un carro de combate en menos de tres minutos.

Los nuevos equipos protectores que la OTAN está distribuyendo en Europa han logrado aumentar de forma considerable la capacidad de sus fuerzas para actuar con eficacia en campos de batalla contaminados y poder realizar sin peligro las operaciones normales de apoyo y abastecimiento. Sin embargo, el equipo constituye únicamente una parte de las necesidades. Una defensa química adecuada debe también abarcar el conocimiento y la comprensión de los problemas relacionados con el tema, los cuales deben ser amplia y detalladamente difundidos a través de la instrucción adecuada y el entrenamiento eficaz del personal y también por medio de una organización militar lo suficientemente perfecta para funcionar en orden y armonía, aún bajo las caóticas condiciones de una guerra moderna, que se agravarán sin duda con la inclusión de operaciones de guerra química en gran escala.

En todos los ejércitos de los principales paises de la OTAN y del Pacto de Varsovia se imparte la instrucción a nivel individual sobre protección química, pero existen multitud de tareas que es preciso realizar de forma colectiva y para las que son necesarios equipos y prácticas especiales. Estas necesidades se solapan con las correspondientes a la defensa biológica y radiológica, y estos tres requerimientos (atómico, biológico y

químico) suelen organizarse conjuntamente bajo la denominación ABQ. Lo habitual en el ejército norteamericano es asignar estas misiones a equipos bajo la dependencia de los Mandos de las Pequeñas Unidades hasta nivel Compañía (incluida), con personal especializado formando parte de cada equipo y que recibe instrucción ABQ más específica. En una Unidad típica del Ejército de los Estados Unidos, del nivel de Compañía, con 100 a 130 hombres, se incluye un Equipo de Defensa ABQ con una plantilla de alrededor de 15 hombres, la mayoría de los cuales desempeñan su misión ABQ como un cometido suplementario. El Equipo se descompone en varios Grupos, unos encargados de la detección química y otros para el control radiológico y la descontaminación. Además de estos Equipos se cuenta con tropas especializadas, con el curso de guerra química, agregadas a las Brigadas o a más altos niveles de mando; entre estas Unidades especializadas figuran por ejemplo las Compañías de Defensa ABQ –una por cada División de combate norteamericana y por cada Mando de Apoyo para Cuerpo de Ejército. La organización soviética, parecida a la del Ejército de Alemania Occidental, pone un énfasis mucho mayor en las Unidades especializadas en ABQ constituyendo un cuerpo especial dentro del ejército, de las cuales se considera que cuenta con más de 80.000 hombres.

A lo largo de todas las maniobras realizadas por Unidades del Pacto de Varsovia, se llevan a cabo de forma rutinaria actividades diversas de defensa química. La prueba de la atención preferente que los soviéticos dedican a este tipo de protección ha llegado a conocimiento de la OTAN a partir de la década de los años 50, y no solamente a través de las publicaciones militares especializadas rusas. Entre el material árabe capturado por los israelitas después de la Guerra de los Seis Días de 1967, figuraba equipo diverso de protección química de origen ruso, suministrado al Ejército árabe como material standard soviético. Material ABQ y equipos similares fueron capturados durante la guerra de octubre de 1973. En ninguna de ambas ocasiones fue capturado ningún tipo de municiones químicas.

En 1974, a consecuencia del material capturado durante la guerra de octubre, el Ejército norteamericano anunció que había asignado un alto grado de prioridad a la adecuada preparación y puesta a punto en defensa química y así, actualmente, se encuentra en pleno proceso de desarrollo de un programa por valor de 1500 millones de dólares, orientado a conseguir hacia mediados de la década de los años 80 unas mejoras sustanciales y unas disposiciones dignas de confianza para oponerse a un eventual ataque químico, así como para poder llevar a cabo operaciones en ambiente contaminado. Se realizan de forma habitual ejercicios y maniobras con todo el personal equipado y vestido con sus prendas protectoras. De forma similar las Fuerzas Aéreas han iniciado un programa, cuyo coste aproximado se eleva a unos 234 millones de dólares y cuya fecha de finalización está prevista para 1984, encaminado a mejorar la defensa química de sus bases aéreas europeas. Estos programas tratan de alcanzar, e incluso superar, para las Fuerzas norteamericanas en Europa, la cantidad y calidad de protección conseguidas por las Fuerzas aliadas, algunas de las cuales, como por ejemplo las Fuerzas británicas, canadienses, francesas y alemanas, vienen concediendo alta prioridad a estos asuntos desde hace tiempo. La OTAN se ha empeñado en un amplio programa, a nivel de Alianza, dirigido a tratar de nivelar las actuales desigualdades existentes y a perfeccionar el conjunto de medidas de su defensa química.

A pesar de lo avanzado de los métodos de protección química de que se dispone en la actualidad, un ataque suficientemente importante podría producir un considerable impacto, no sólo ocasionando bajas entre tropas sorprendidas sin haber adoptado una protección adecuada, o dotadas con un equipo defectuoso o empleado de forma inadecuada, sino también como consecuencia de una disminución de la efectividad en el cumplimiento de la misión encomendada y causada por las medidas protectoras en sí mismas. Sin embargo, cuanto más completa y perfecta es la reacción protectora de una Unidad combatiente, menos rentable resulta el empleo de armas químicas contra ella en comparación con los resultados que pueden obtenerse con el uso de otro tipo de armas. Para producir bajas, los principales rivales no nucleares de los agresivos químicos no persistentes, como el sarin, son las municiones incendiarias y las que estallan en el aire de alto poder explosivo, o bien las municiones de fragmentación, contra tropas al descubierto, y los explosivos de combustión aérea, contra tropas en abrigos enterrados. Los posibles competidores de los agresivos persistentes, que como el VX son capaces de crear "zonas prohibidas", son las diversas variedades de minas diseminadas al azar, entre las que podemos incluir las del tipo de lanzamiento por artillería. Aunque no se hayan llevado a cabo comparaciones detalladas entre los diferentes tipos de munición, las tablas de consumo de municiones para cada una nos ofrecen una guía aproximada. Para personal no protegido o sin preparación, los efectos producidos por las armas químicas, medidos en bajas, pueden resultar competitivos con relación a los efectos de las armas convencionales, pero no resulta lo mismo en el caso de un ataque contra tropas preparadas y dotadas de una buena protección química, especialmente si la comparación se establece en relación con los nuevos tipos de armas contra personal convencionales que actualmente se están distribuyendo, mucho más eficaces. Los soldados dotados con equipo de protección química son mucho más vulnerables a un ataque convencional que a un ataque con agresivos químicos. Además, debe ser tenido en cuenta que, al menos para la OTAN, los recursos dedicados a las armas químicas no contribuyen en absoluto a la potencia de fuego, a no ser que el otro bando decida anticiparse en el empleo de agentes químicos.

Resulta mucho más difícil poder medir el grado en que se deteriora el cumplimiento de la misión, por efecto del empleo de protección antiquímica, que calcular las bajas producidas por un ataque con armas químicas. Sólo en época reciente se han elaborado en los Estados Unidos unos test controlados a gran escala y orientados a proporcionar datos adecuados y fiables. Es seguro que se produce deterioro en algún grado; para algunas misiones, este deterioro alcanza un grado más alto que para otras. Las estimaciones realizadas oscilan entre casi cero –como en unos ejercicios británicos recientemente celebrados en una base aérea de Alemania, durante los cuales se midieron los tiempos de ida y regreso de aviones tácticos, con las tripulaciones tanto de los aviones como las que permanecían en tierra completamente protegidas– hasta alcanzar más del 30 por ciento en algunos tipos de ejercicios, sin especificar, de combate en primera línea, citados en un testimonio de ciertos Oficiales pertenecientes al Departamento de Defensa de los Estados Unidos ante el Congreso.

Como la población civil no puede ser, por lo general, dotada con equipos protectores e instruida en el empleo adecuado de los mismos en el grado en que lo son las Unidades combatientes, aquella está expuesta a padecer unos efectos mucho más severos ante un ataque químico. Las armas químicas existentes no han sido diseñadas para alcanzar resultados estratégicos y la doctrina militar no contempla el caso de ataques quími-

cos dirigidos intencionadamente contra la población civil. Sin embargo, las nubes de vapor de gas nervioso podrían recorrer largas distancias a favor de viento y llegar más allá del campo de batalla antes de haber perdido su toxicidad, y el terreno contaminado por los gases nerviosos podría permanecer activado en la zona de combate hasta bastante tiempo después de que la batalla propiamente dicha haya dado fin. Por todo ello, las armas químicas utilizadas en el campo de batalla llevan consigo unas posibilidades inmensas de producir bajas entre la población civil. Puede calcularse por ejemplo que la contaminación con sarin sobre un objetivo, prevista para producir un 20 por ciento de bajas entre personal combatiente provisto de respiradores, pero sin llevarlos acoplados de primera intención, podría llegar a producir, en unas condiciones atmosféricas habituales en la zona central de Alemania, la muerte de personal no protegido hasta una distancia igual o superior a los 20 kilómetros del lugar del ataque, y ocasionar incapacidades graves al personal situado a una distancia superior al doble de la que se acaba de señalar. En un campo de batalla europeo en el que se empleasen métodos de guerra química, podrían producirse millones de víctimas entre la población civil.

Con independencia de los factores estrictamente militares tomados en consideración para llegar a determinar la utilidad de las armas químicas, existen dentro de la OTAN otras consideraciones fundamentales de carácter político en relación con su posible despliegue y empleo. Entre los países aliados de la OTAN únicamente poseen este tipo de armas los Estados Unidos y Francia. Italia (al igual que Bulgaria, Hungría y Rumania dentro del Pacto de Varsovia) se encuentra constreñida por acuerdos internacionales que limitan sus posibilidades de adquisición de armas químicas. Alemania Occidental, igualmente limitada por tratados, ha renunciado a perpetuidad y por entero a las mismas y en este sentido y en su papel de único depositario de las reservas y depósitos norteamericanos en Europa se ha convertido en un huésped reacio. En un libro blanco editado con carácter oficial, las Fuerzas Armadas alemanas han negado cualquier tipo de intenciones, actuales o futuras, de tratar de conseguir acceso a dichos depósitos, o incluso instruir a sus Unidades de combate en el empleo de armas químicas.

Las razones aducidas en defensa del mantenimiento por parte de la OTAN de un poder potencial de represalia química varían según que se tenga en cuenta la hipótesis de que los soviéticos puedan emplear agresivos químicos en una guerra que en todos los demás aspectos sea de tipo convencional, o bien donde estén utilizando también armas nucleares. En el caso de un ataque principal ruso de tipo convencional dirigido contra Europa, se considera que la capacidad de la OTAN para responder con una acción de la misma naturaleza podría constituir una medida de disuasión importante y con escaso riesgo de provocar una escalada, y contribuyendo así a impedir que los rusos inicien una guerra química. Se supone que los soviéticos considerarían la represalia de la OTAN como una forma de compensar cualquier ventaja adquirida como consecuencia del empleo de agentes químicos. Además, como una respuesta de la OTAN de estas características representaría únicamente una respuesta a algo que había sido iniciado por el bando contrario, la amenaza de represalia de la OTAN podría ser verosímil en tanto que el otro tipo de amenaza —mucho más peligrosa desde el punto de vista de su posibilidad de provocar la escalada—, la amenaza de una represalia nuclear, podría serlo menos. También se argumenta en el sentido de que si la disuasión fallase, las Fuerzas de la OTAN podrían frenar la escalada en el empleo de los agentes químicos —tanto en extensión como en intensidad— e incluso impedirla, mostrando y poniendo de manifiesto su capacidad para emplear sus propios medios químicos, y haciendo ver que en una posible confrontación de este tipo llevarían la mejor parte a todos los niveles, tanto en el campo de batalla como en las zonas de retaguardia.

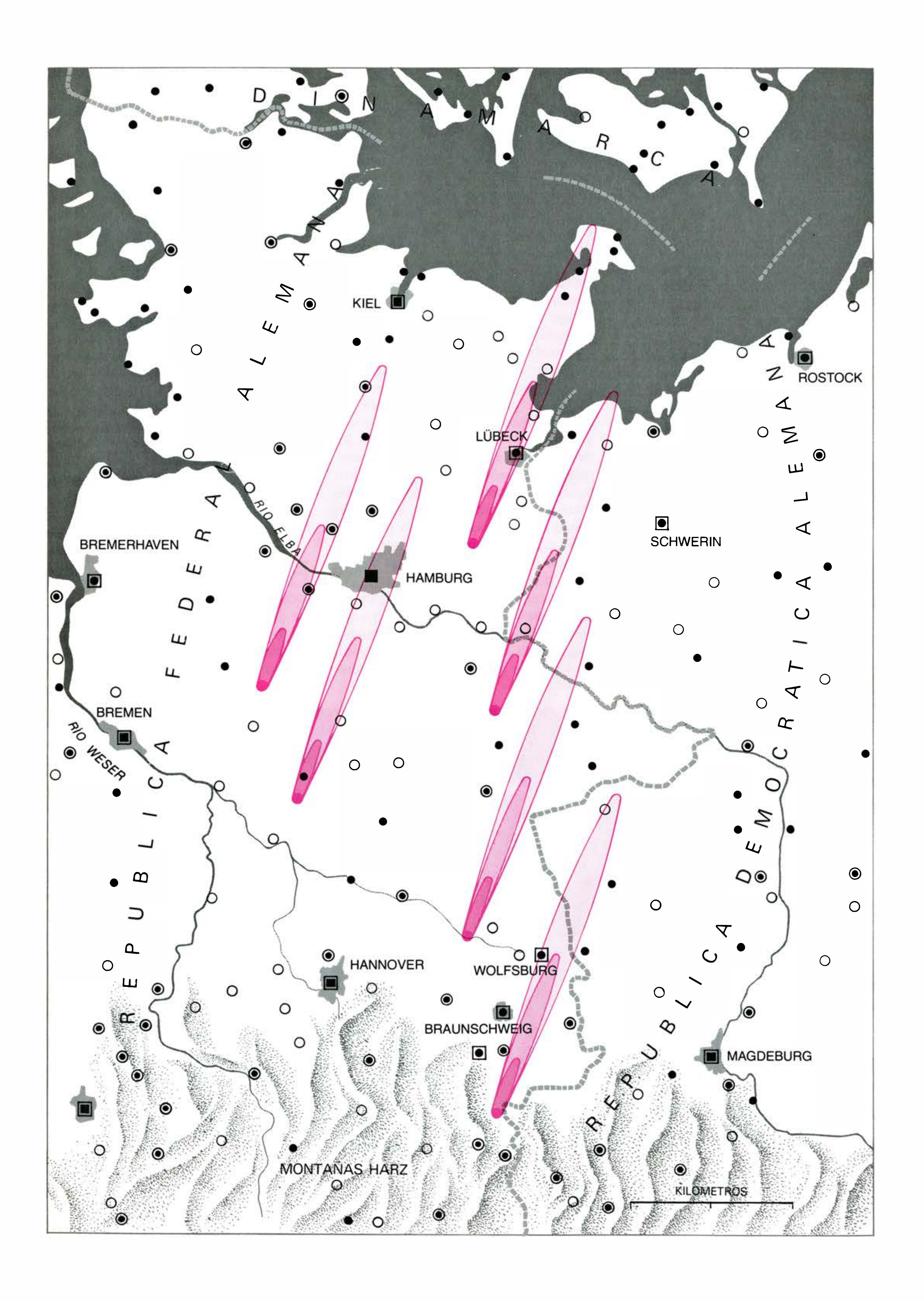
La doctrina de los Estados Unidos, al hablar de las armas químicas, pone de manifiesto estas ideas en sus reglamentos vigentes al señalar: "El objetivo de la política norteamericana va encaminado a impedir el empleo de las armas químicas por parte de otras naciones. Si se fracasa en este intento de disuasión y los gobiernos nacionales autorizan el empleo de los agresivos químicos, el principal objetivo será conseguir finalizar las operaciones de este tipo de guerra tan pronto sea posible, empleando para ello los niveles de intensidad más bajos".

Bajo la hipótesis de que las armas nucleares estén ya utilizándose, los presuntos beneficios que podrían resultar de una capacidad de represalia química, para lograr detener la escalada, desaparecen prácticamente. La utilidad del poder de represalia química se basará tan sólo en sus posibilidades de producir bajas en el campo de batalla e imponer retrasos y dificultades en los movimientos de las Unidades enemigas.

El valor disuasorio de las actuales armas químicas en poder de la OTAN y su capacidad potencial para detener la escalada han sido puestos en duda, tanto en términos de eficacia militar inmediata, como en el terreno más amplio de las consideraciones estratégicas. Si los soviéticos tratasen de emplear armas químicas en apoyo de una acción ofensiva de tipo convencional, la reacción de represalia de la OTAN en un sentido similar y al mismo nivel obligaría a las fuerzas rusas a adoptar unas medidas de protección química más rigurosas que las requeridas por los países de la OTAN para oponerse a su propio ataque químico. Esta consecuencia podría, o no,

●	0-10.000
○	10.000-25.000
⦿	25.000-100.000
▣	100.000-250.000
▣	250.000-1.000.000
■	MAS DE 1.000.000

NUMERO DE BAJAS EN POTENCIA entre la población civil que podrían producirse en un ataque químico de carácter hipotético en un campo de batalla de la Europa Norcentral, señalado en este mapa por unas curvas de nivel de dosis equivalentes. Los puntos de color oscuro representan objetivos de entidad batallón (de una superficie de un kilómetro cuadrado o menor), cada uno de los cuales ha sido atacado con bombas GB, a base de un total de unas seis toneladas de bombas por cada objetivo, con carga de gas nervioso, cantidad prevista para producir aproximadamente un 20 por ciento de bajas en tropas, dotadas, aunque no llevaran acopladas las máscaras antigás en el instante inicial. El tiempo atmosférico se ha supuesto fresco, seco y nublado, con una brisa ligera procedente del sudoeste. La mayor parte de la población existente en el interior de las zonas enmarcadas por las líneas de color suave serían víctimas del gas venenoso, aunque no de forma mortal; su visión podría quedar afectada y se presentarían síntomas de dolores de cabeza, dificultades respiratorias y prolongados trastornos visuales. En las zonas en el interior de las líneas de color medio, el personal no protegido quedaría incapacitado por varios días. Las zonas más interiores, de color intenso, son aquellas en que el personal sufriría con mayor severidad los efectos del envenenamiento. Tan sólo aquellas personas adultas, de edad mediana, situadas en las cercanías del límite señalado por las líneas divisorias podrían tener alguna buena probabilidad de supervivencia y muchos de ellos llegarían al umbral de la muerte, afectados de colapsos y convulsiones. En unas condiciones atmosféricas más estables, por ejemplo de noche, con cielo claro o parcialmente despejado, todas las zonas señaladas quedarían mucho más duramente castigadas; en condiciones menos estables, como por ejemplo en tiempo veraniego y caluroso, las zonas afectadas podrían reducirse. Por lo general, se producirán fluctuaciones en las condiciones del viento, a lo largo de un período de unas 10 horas, con lo que el contorno de las curvas señaladas en la figura sufrirían variaciones. Los seis ataques hipotéticos indicados en la ilustración de la página opuesta utilizarían una parte de un porcentaje de la cantidad total de gas nervioso que pudiera emplearse en una guerra química a gran escala en Europa.

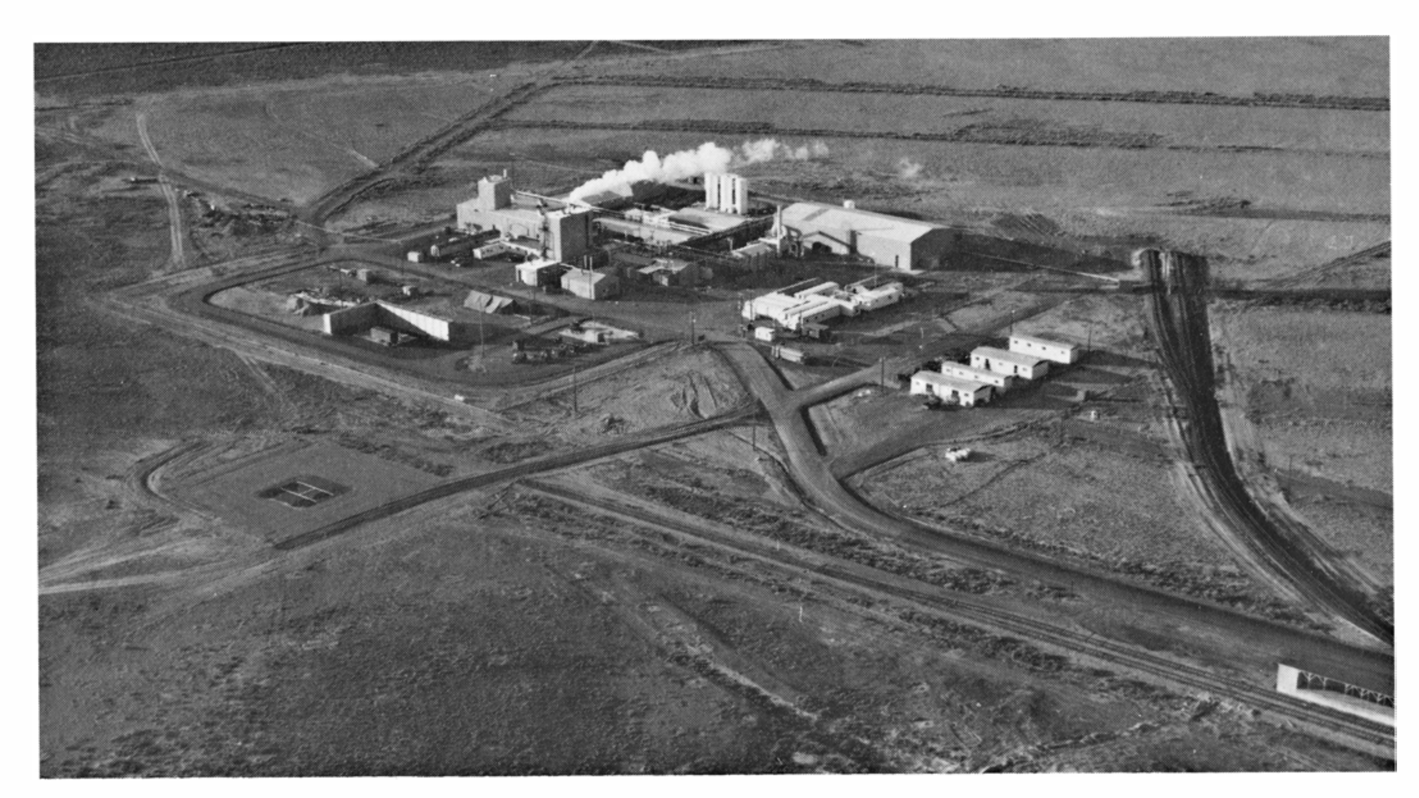

DINAMARCA
REPUBLICA FEDERAL ALEMANA
REPUBLICA DEMOCRATICA ALEMANA
KIEL
ROSTOCK
LÜBECK
SCHWERIN
RIO ELBA
HAMBURG
BREMERHAVEN
BREMEN
RIO WESER
HANNOVER
WOLFSBURG
BRAUNSCHWEIG
MAGDEBURG
MONTAÑAS HARZ
KILOMETROS

resultar de algún significado a la hora de evaluar los resultados totales, pero su mera posibilidad –se dice– difícilmente sería contemplada por los rusos como algo fácil de ser compensado por las ventajas inmediatas que podría proporcionarles el acudir al recurso de los agresivos químicos. Un ataque químico inicial, al contrario de uno adoptado como represalia, podría conseguir una alta probabilidad de sorprender a las fuerzas oponentes en un bajo grado de protección química y como consecuencia tendría mayores probabilidades de conseguir resultados tácticos importantes. Por ello existe la opinión de que las armas químicas en poder de la OTAN ayudarían muy poco en el caso de un intento de disuasión para evitar el caer en una guerra química, a no ser que la amenaza de una represalia represente un fuerte impulso potencial en la escalada: suficientemente fuerte como para hundir la protección rusa de la línea del frente, o suficientemente profunda como para alcanzar objetivos en la retaguardia soviética.

Sin embargo, se argumenta que la OTAN tendría que adoptar unos muy serios compromisos que acompañasen a una respuesta de tal naturaleza, disminuyendo así la credibilidad de que pudiese llegar a producirse. La extensión o intensificación del empleo de armas químicas en el campo de batalla podría retrasar la acción y el ritmo de las contraofensivas de los países de la OTAN y aumentar de forma sustancial las bajas entre la población civil. Unos ataques químicos con mayor potencia o radio de acción, con unas consecuencias intrínsecamente difíciles de predecir o controlar, podrían representar un grave peligro de provocar una respuesta nuclear o de otra naturaleza que produciría un fuerte impulso a la escalada, hecho que la OTAN probablemente prefiera evitar o conservar como su propia iniciativa. Las posibilidades de represalia consecuentes de una capacidad de guerra química de tal naturaleza podrían, en términos de valoración de posibles objetivos, solaparse con las proporcionadas por las actuales armas nucleares en poder de la OTAN, de modo que los soviéticos podrían interpretar el despliegue del armamento químico aliado como una señal de indecisión por parte de éstos para emplear las armas nucleares. Así, un aumento en la confianza de represalia química, en el sentido de poder impedir un ataque de la misma naturaleza por parte soviética, podría producir como consecuencia una reducida capacidad de impedir la guerra en sí misma.

Estas últimas reflexiones resultan por el momento un tanto bizantinas, ya que las armas químicas que en la actualidad posee la OTAN en Europa sólo bastan para llevar a cabo una acción de represalia limitada. Los principales países de la OTAN han puesto claramente de manifiesto que no están dispuestos a favorecer la extensión de los depósitos de armas químicas, tanto por sí mismos, como facilitando los aumentos de capacidad de almacenamiento cedidos a los Estados Unidos. Las consideraciones de política interna han ejercido cierta influencia, pero también se ha reconocido que los recursos necesarios para aumentar y modernizar los depósitos de la OTAN, desplegando probablemente municiones binarias, llevarían consigo una considerable disminución en otros programas de la OTAN, como por ejemplo la actual campaña de mejora y perfeccionamiento de la capacidad militar convencional. Existe también el temor de que si se llegase a emplear un poder de represalia química incrementado, la consecuencia sería una situación de punto muerto en el campo de batalla similar a la de la Primera Guerra Mundial, con resultados de un gran incremento en la producción de bajas y de destrucción en Europa.

El mantenimiento de un poder de represalia química y el inicio de negociaciones para lograr un acuerdo sobre limitación de armamento químico son dos caminos alternativos para tratar de alcanzar un mismo objetivo: reducir al mínimo la amenaza representada por



INSTALACION DE ELIMINACION, para la destrucción de las armas químicas inservibles, construida recientemente en los Depósitos del Ejército situados en Tooele. El agente GB es descompuesto aquí por hidrólisis en solución alcalina, el agente VX por cloración y el gas mostaza es destruido por incineración. La eliminación de los remanentes inútiles de armas químicas letales, ya en marcha, se cree que se prolongará durante siete años más y que consumirá un pequeño tanto por ciento de las reservas de los Estados Unidos. Esta planta sirve de prototipo de las instalaciones que serán necesarias para la eliminación a gran escala de las reservas de armas químicas en el supuesto de que entrase en vigor un acuerdo de desarme químico.

las armas químicas del adversario. No obstante, únicamente la limitación en los armamentos podrá lograr impedir el crecimiento de las armas del oponente e invertir el ciclo normal en el sentido de que los programas militares de un bando conducen a la creación de otros similares en el bando contrario. Además, sólo la limitación de armamentos es capaz de incidir sobre el problema de una posible proliferación de armas químicas, con peligro de utilización en conflictos y confrontaciones que pudieran estallar entre países distintos de los que componen la OTAN y el Pacto de Varsovia. Ambos caminos de aproximación al problema entrañan riesgos. El mantenimiento de las armas químicas no hace desaparecer la amenaza, e incluso puede llegar a agravarla. La iniciación de conversaciones para conseguir un acuerdo sobre limitación de armamentos podría, en el peor de los casos, exponer a la OTAN a un riesgo apenas disminuido, en tanto que le impediría el propio empleo de su capacidad química. Ambos caminos están sometidos a presiones políticas importantes, con independencia absoluta de las presiones estrictamente militares que impongan dichas armas en cuanto a su posible fortaleza o debilidad. Por una parte, existen limitaciones de tipo político en relación con las medidas que puedan establecerse para la verificación del cumplimiento de un posible acuerdo. Por otra, existen otro tipo de presiones políticas en relación con la naturaleza y eficacia de la fuerza de represalia que la OTAN puede mantener. Todas estas presiones están muy enraizadas, no sólo en la opinión pública, sino también en la política de defensa nacional de los principales países signatarios de la OTAN, como por ejemplo Alemania Occidental.

A pesar de ello, la OTAN dispone de dos factores básicos en que apoyar la configuración de su política de armamento químico y que proporcionan una flexibilidad considerable a la misma. Uno de estos factores es la nueva mentalidad que se está fraguando en la Europa actual, opinión orientada a conseguir un notable perfeccionamiento en relación con la protección química. Este factor hace disminuir la amenaza que las armas químicas del Pacto de Varsovia representan para los países de la OTAN, tanto en la situación presente y dentro del marco de un acuerdo sobre limitación de armamentos, como si el otro bando mantiene en su poder o incluso fabrica armas químicas en violación de dicho presunto acuerdo. El otro factor que proporciona flexibilidad a la política de la OTAN es la amplia gama de armas convencionales y nucleares modernas, a todos los niveles de potencia, que llegan a eclipsar las posibilidades de acción de las armas químicas, tanto disuasorias como de combate. Estas consideraciones ayudan a concretar los límites dentro de los cuales se desarrollan las actuales conversaciones bilaterales entre la Unión Soviética y Estados Unidos en torno al desarme químico.

En la reunión en la cumbre de Moscú de julio de 1974, el Presidente Nixon y el Secretario Breznev hicieron una declaración conjunta en el sentido de que habían llegado a un acuerdo para adoptar una iniciativa compartida sobre prohibición de armas químicas. Este acuerdo fue reafirmado en noviembre del mismo año en Vladivostok por Ford y Breznev y produjo como consecuencia el que en agosto de 1976 se iniciasen en Ginebra las actuales negociaciones bilaterales. Al final de la décima ronda de las conversaciones, en agosto de 1979, se había llegado al acuerdo de que tanto las armas químicas letales, como las que únicamente producen incapacitación, deberían ser incluidas dentro del marco de un acuerdo sobre armas químicas y que los agentes químicos de alta toxicidad, de aquellos tipos y en aquellas cantidades que no tengan razón de ser para otros propósitos que no sean su utilización en una guerra química, deberían ser igualmente prohibidos y quedar sujetos a determinadas condiciones y criterios que facilitasen la adecuada verificación. También se ha acordado que, al ratificar el tratado, los estados deberán declarar sus depósitos de armas químicas y sus medios de fabricación y que la verificación de la destrucción de los mismos, dentro de un determinado periodo, deberá basarse en un conjunto combinado de medidas nacionales e internacionales, entre las que cabe incluir previsiones sobre solicitud de inspecciones sobre el propio terreno, que investiguen supuestas y posibles violaciones. Aunque estos acuerdos representan un progreso sustancial, quedan todavía por delante muchos asuntos críticos a tratar, ya que, por ejemplo, se ha adelantado muy poco hasta la fecha en relación con el alcance de la información particular a proporcionar, caso de ser requerida, o sobre el punto crucial y delicado de los métodos concretos a emplear para conseguir verificar la destrucción de armas químicas y la eliminación de sus medios de producción.

Los métodos de vigilancia existentes, entre los que se incluye una gran variedad de sistemas para recoger y evaluar la información, poseen una capacidad importante, aunque limitada, para detectar las actividades de guerra química en

los territorios del Pacto de Varsovia. Tales sistemas de verificación, en sí mismos, son considerados por los Estados Unidos y otros países de la OTAN por completo inadecuados para poder controlar el cumplimiento de un tratado de desarme químico. Sin embargo, no resulta necesario que un sistema de verificación tenga que llegar a detectar todas y cada una de las actividades e instalaciones precisas para crear o mantener un proceso de fabricación de armas químicas. Lo que sí es necesario es una alta probabilidad de poder detectar unos preparativos de guerra química a gran escala, que puedan llegar a representar una amenaza militar importante. Es fundamental poner de manifiesto, a este respecto, que la efectividad de las medidas de verificación aumenta si se logra alcanzar un alto nivel en la defensa química. Una buena defensa obliga a perfeccionar el nivel de preparación de una guerra química, necesario para suponer una amenaza militar importante, haciendo que la ocultación resulte más dificultosa y la inspección menos necesaria.

Aunque existe históricamente una gran divergencia entre los caminos de aproximación norteamericanos y soviéticos a los problemas de verificación, los acuerdos ya alcanzados sobre declaraciones de armamento químico y de medios de producción, así como sobre el empleo de una combinación de medidas nacionales e internacionales para poder verificar su eliminación, pueden proporcionar las bases para llegar a un acuerdo aceptable por ambos interlocutores. Un camino para llegar de una forma fiable a verificar la destrucción de las armas y las sustancias químicas declaradas podría consistir en proceder a su transporte hasta una o varias zonas, elegidas por el país propietario de las mismas, y en las cuales se procediese a su destrucción bajo un control internacional. Incluso a través de técnicas de eliminación automatizadas, este proceso podría alargarse por varios años, a lo largo de los cuales los países interesados podrían adoptar medidas que les garantizasen que el acuerdo iba a ser cumplido con exactitud por ambas partes. La eliminación de las instalaciones de producción declaradas podría ser supervisada por reconocimientos vía satélite, los cuales podrían venir a continuación y como complemento de las visitas e inspecciones que se realizarían en el propio terreno para comprobar que las instalaciones a desmantelar sean del tipo y características declaradas. Estos procedimientos podrían garantizar la eliminación de grandes cantidades de armas químicas y de instalaciones de fabricación importantes. El problema de la verificación de la posible existencia o ausencia de remesas de munición o de instalaciones que no hayan sido objeto de declaración puede ser tratado de resolver por medio de medidas cuidadosamente seleccionadas con base en el derecho, sobre el que ya se ha llegado a un acuerdo, de solicitar inspecciones sobre el propio terreno en los casos en que por otros procedimientos de vigilancia se han llegado a detectar actividades sospechosas.

La búsqueda de soluciones políticas basadas en todas las posibilidades que se han señalado y de otras que puedan aparecer más adelante, al objeto de llegar a un acuerdo sobre limitación de armas químicas, ha señalado un camino a seguir que, no obstante, estará sujeto a cambios y fluctuaciones según el desarrollo de las relaciones internacionales. Si los Estados Unidos y la Unión Soviética son capaces de ponerse de acuerdo en el tema de la guerra química, el siguiente peldaño consistirá en presentar una propuesta de acuerdo multilateral ante la Conferencia de Desarme de Ginebra. Las negociaciones exploratorias y los estudios técnicos que se han venido desarrollando a lo largo de los pasados once años podrían culminar finalmente en un tratado de armas químicas, con un amplio apoyo internacional, aunque ello ocurriría algún tiempo antes de que aparezcan evidentes los últimos éxitos o fracasos relacionados con estos intentos. Entre tanto, existe el peligro de que las actuales limitaciones y prohibiciones sobre armas químicas pudieran perder parte de su efectividad y que determinados países no implicados hoy día pudieran interesarse en la adquisición de armas químicas, como se ha puesto de manifiesto en los recientes alegatos, sin confirmar, aunque preocupantes, sobre el empleo de gases venenosos en Afganistán y Sudeste de Asia.

Lo que está en juego en las negociaciones va más allá del problema de llegar a un acuerdo respecto a las amenazas que las armas químicas representan para la seguridad de las naciones. La humanidad ha entrado en un período de entendimiento y conocimiento rápido y acelerado de los procesos vitales bioquímicos y celulares fundamentales. A medida que estos conocimientos se difunden, igual dirección siguen el alcance y la tendencia de sus posibles aplicaciones para el bien y para el mal. En la larga carrera de la existencia de un tratado de desarme químico, además del actual biológico, puede colaborar la idea básica de que los cada vez más profundos conocimientos sobre los procesos vitales se dirijan únicamente a conseguir propósitos altruistas.

Excitaciones en superficies sólidas

Fenómenos de gran interés tecnológico asociados a campos como microelectrónica, quimisorción y catálisis heterogénea dependen todos de las propiedades de superficies sólidas

F. Flores y F. García Moliner

El descubrimiento del efecto transistor, que explica el control de un flujo de corriente entre dos electrodos a través del potencial aplicado a un tercer electrodo, en 1947, por Bardeen, Shockley y Brattain fue el resultado directo de una intensa investigación básica en el campo de las superficies sólidas en los años posteriores a la segunda guerra mundial. Este esfuerzo ha recibido en los últimos diez años un nuevo impulso debido, en especial, a las nuevas condiciones tecnológicas en el ultra-alto vacío, que ha permitido un control adecuado de la preparación y condiciones de la superficie. Esto ha convertido a la física de superficies en una rama muy activa de la física actual. Su interés es triple: por los problemas de investigación básica que plantea, por su relación con otros campos científicos y por sus propias aplicaciones directas de tipo tecnológico. Como parte de la investigación básica en física de sólidos, la física de superficies presenta nuevos e interesantes problemas que, en definitiva, aparecen por las nuevas interacciones que introduce la superficie. Tiene también interesantes fronteras comunes con campos tan importantes como la biofísica o la fisicoquímica de interfases y, en especial, con problemas como corrosión superficial y catálisis heterogénea, cuyas aplicaciones tecnológicas no necesitan comentario. Es también muy conocido el auge impresionante de la microelectrónica de estado sólido, que constituye la aplicación tecnológica más espectacular de la física de superficies sólidas. Su impacto en técnicas informáticas diversas tampoco necesita apostilla. El progreso en este campo va de la mano con una miniaturización creciente. La relación de superficie a volumen aumenta al disminuir el tamaño, de modo que la miniaturización supone una importancia cada vez mayor de las propiedades de la superficie.

Los avances tecnológicos en estos campos ya no se realizan de manera empírica, sino que están profundamente imbricados en la investigación básica, y hasta la descripción de los progresos tecnológicos de frontera es formulada usando los conceptos y la terminología de la ciencia fundamental, que en este caso es la física de superficies.

En este artículo nos limitaremos a describir una pequeña parcela dentro del vasto campo que ofrece la fenomenología de superficies sólidas. Pero incluso para un objetivo tan limitado es preciso discutir primero cómo es esta fenomenología en el interior de la materia sólida.

Un agregado macroscópico de materia en estado sólido constituye un sistema muy condensado. Imaginemos un cubo cuyo lado mide una micra (una milésima de milímetro). Típicamente en un cubo así de materia sólida hay más de cien mil millones (10^{11}) de átomos. Cada átomo tiene un núcleo y varios electrones, y todas estas partículas están en mutua interacción. De esto resulta una gran variedad de estados. Los diferentes estados del sólido pueden caracterizarse en función de su energía, lo que globalmente constituye su espectro. Por otra parte, todo estado excitado del sólido puede imaginarse como uno que se alcanza a partir del estado fundamental —el estado de energía más baja— mediante un conjunto de "excitaciones elementales". El concepto de excitación elemental es muy útil en física, ya que permite clasificar de forma simple cualquier excitación compleja de un sistema.

La espectroscopía tiene por objeto obtener las distintas excitaciones elementales de un sistema físico. Su idea central es actuar sobre el sistema con algún estímulo externo que opera como sonda. Se trata, por ejemplo, de bombardearlo con partículas (electrones, neutrones, átomos, iones), o con radiación incidente, observar los fenómenos que entonces se producen y, debido a que estos fenómenos ponen en juego las excitaciones elementales (o "modos normales") propias del sistema, obtener así información sobre su espectro.

El análisis de un sistema físico consiste, por tanto, en la clasificación de sus excitaciones. En general, esta clasificación depende de sus simetrías. En los primeros años del desarrollo de la física cuántica (años 20), la física atómica representaba el campo de investigación física más avanzado, cuyo interés se concentraba en el estudio y clasificación de los distintos espectros atómicos. Allí, lo relevante del sistema físico era su simetría esférica, de forma que las excitaciones del sistema —o sus estados electrónicos— se clasificaban de acuerdo con el momento angular, que es el número cuántico asociado a esta simetría. De manera análoga aparece el número cuántico llamado spin. Con el avance en el conocimiento de la materia se desarrollan la física nuclear y, más recientemente, la física de partículas elementales o de altas energías. En este ámbito, y en función de las simetrías formales que aparecen en la descripción de las partículas y sus interacciones, lo que se revela a través de la correspondiente espectroscopía, aparecen distintas clasificaciones basadas en nuevos números cuánticos: el isospin, la extrañeza, etcétera.

En un sólido cristalino la simetría más relevante viene dada por su periodicidad espacial. Como vamos a ver inmediatamente con algunos ejemplos, asociado a esta simetría existe un número cuántico: el momento cristalino **k**. (Por convención, los vectores se escriben en negritas.) En estas condiciones, conocer el espectro de excitaciones de un sólido es conocer para cada tipo distinto de excitación (también veremos algunos en

seguida) la llamada relación de dispersión $E(\mathbf{k})$, que da la energía de excitación como función del momento $\mathbf{k}$.

Veamos, en primer lugar, las excitaciones elementales asociadas a la vibración cristalina. Imaginemos en un ejemplo sencillo el caso unidimensional de la ilustración de esta misma página. La red cristalina se supone formada por átomos de masa m, siendo a la distancia entre dos átomos vecinos. Si una de estas masas se desplaza vibrando, la interacción con los otros átomos hace que la oscilación se transmita creando un modo colectivo de vibración en el que todos los átomos oscilan al unísono. Esta onda puede describirse por la oscilación u_i de cada átomo i, dada por

$$u_i = u_0 \cos 2\pi \left(\frac{x_i}{\lambda} - \nu t\right)$$

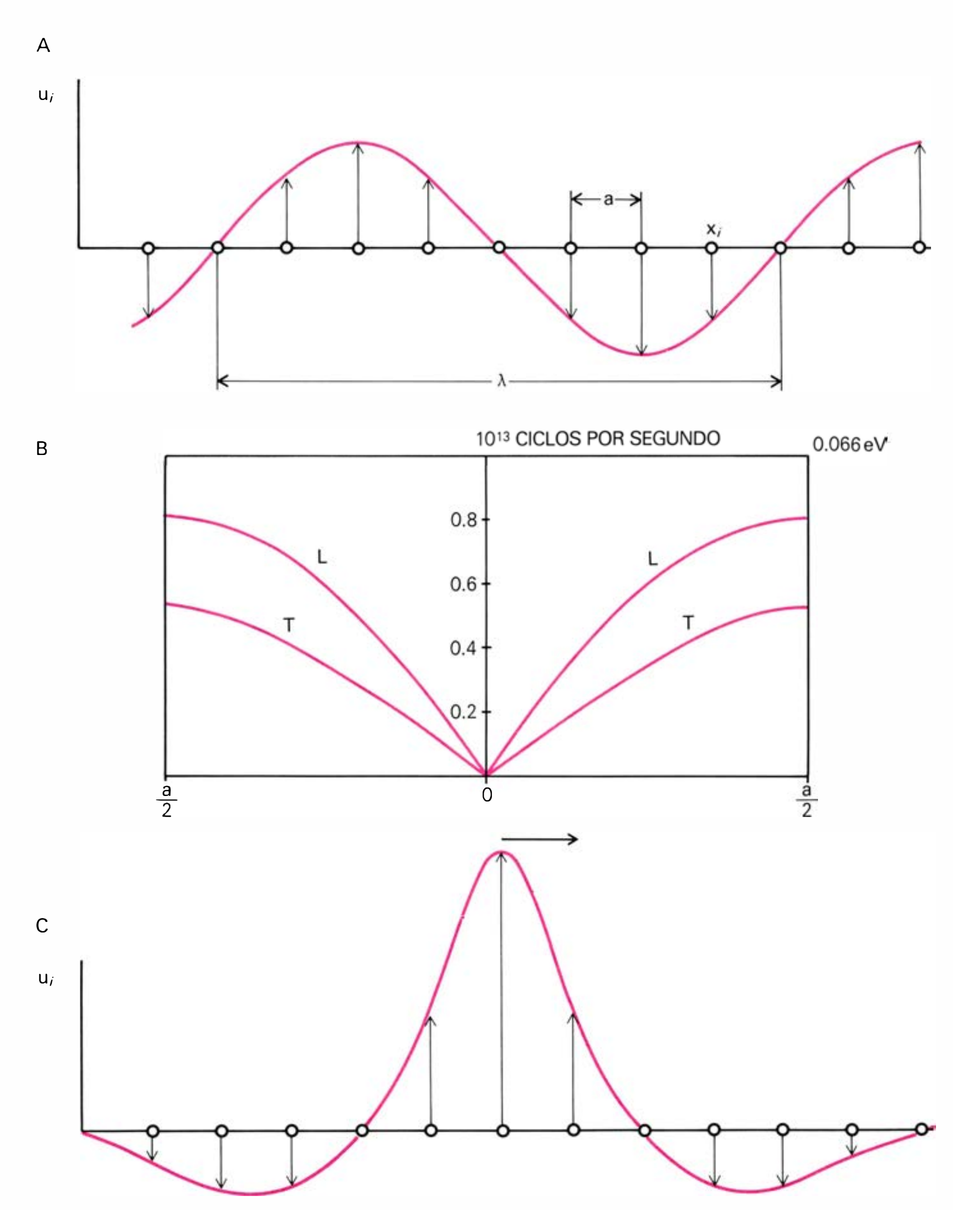
donde λ es la longitud de onda, ν la frecuencia natural de la vibración y t, el tiempo [*véase la ilustración de la derecha*]. Si el desplazamiento u_i es paralelo o perpendicular a la dirección de la cadena, tenemos una vibración que se llama longitudinal o transversal, respectivamente.

Una onda con frecuencia y longitud de onda bien definidas, como la discutida arriba, se llama monocromática. No todas las ondas monocromáticas, sin embargo, pueden excitarse en la cadena. Esto depende de las características del medio. En general, la relación $\nu = \nu(1/\lambda)$ es típica de cada material y liga la frecuencia y el número de ondas $k = 1/\lambda$ de la excitación. En la ilustración de la derecha se ha dibujado esta relación para las ondas longitudinales y transversales del aluminio (Al) a lo largo de una dirección particular. Conviene indicar, por otra parte, que no todos los valores de k son físicamente significativos. Sólo los comprendidos entre $-1/2\,a$ y $1/2\,a$ representan una excitación real, ya que, cuando λ es demasiado pequeño, las oscilaciones que aparecen entre átomos carecen de significado físico. En cambio, cuando la longitud de onda es muy grande comparada con la distancia entre dos átomos, podemos describir el medio como un continuo elástico, que admite las conocidas ondas elásticas.

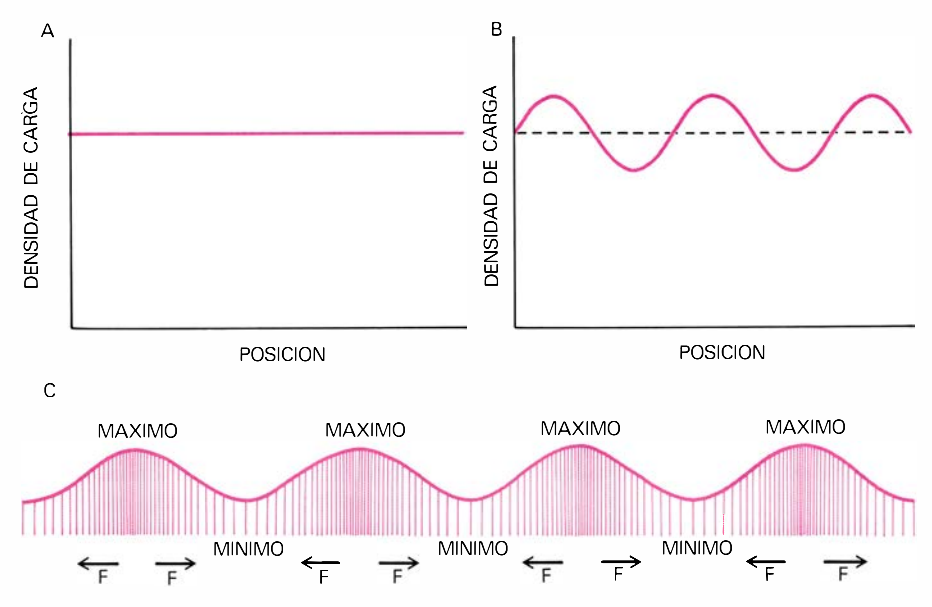
Indiquemos, además, que combinando ondas monocromáticas alrededor de una frecuencia dada, se puede construir un "paquete de ondas", que representa una perturbación muy localizada [*véase la ilustración de esta página*]. A todos los efectos físicos, el paquete se comporta como una partícula moviéndose en el medio. En una descripción cuántica esta "cuasipartícula" aparece con energía $E = h\nu$ y momento $\mathbf{p} = h\mathbf{k}$, donde h es la constante de Planck. (Es frecuente referirse simplemente a $\mathbf{k}$ como el momento.) En física de sólidos se habla entonces del "fonón", la cuasipartícula asociada a la excitación de una vibración de la red. De la relación $\mathbf{v} = \nu(\mathbf{k})$ se deduce inmediatamente la relación de dispersión $\mathbf{E} = E(\mathbf{p})$ de los fonones. Los valores de $\mathbf{p}$, o $\mathbf{k}$, definen el momento cristalino de la cuasipartícula, y la relación anterior describe las excitaciones elementales llamadas fonones.

Otra excitación elemental importante es el "plasmón", asociado a una vibración colectiva de los electrones de un sólido. Un caso típico aparece en metales como el sodio (Na) o Al, donde los electrones de conducción se pueden mover dentro del cristal casi con completa libertad. En estos cristales la densidad media de carga eléctrica puede presentar una oscilación como efecto del campo eléctrico inducido por la propia oscilación de carga [*véase la ilustración de la página siguiente*]. Las frecuencias típicas de estas oscilaciones están por encima de 10^{15} hertz (ciclos por segundo).

Como en el caso de los fonones, estas ondas pueden ser estudiadas en su aspecto corpuscular. El cuanto elemental



ONDA DE VIBRACION DE UNA CADENA UNIDIMENSIONAL. En la parte (*A*) de la figura se muestra el desplazamiento u_i de cada átomo de coordenada x_i. La onda se caracteriza por la relación de dispersión $\nu = \nu(k)$ dibujada en (*B*); aquí se muestran las ondas longitudinales (*L*) y transversales (*T*) para el caso del aluminio a lo largo de los ejes principales del cristal. En esta misma parte (*B*) se da también la energía $E = h\nu$ asociada al fonón, que es el cuanto elemental o corpúsculo asociado a la onda de vibración de frecuencia ν y número de ondas $k = 1/\lambda$ [Datos tomados de C. B. Walker, publicados en *Physical Review, 103* (1956) 547]. Si se construye un paquete de ondas se obtienen los desplazamientos dados en (*C*); aquí la excitación localizada se propaga en el sentido de la flecha.



EN UN GAS DE ELECTRONES LIBRES, éstos, microscópicamente considerados, se mueven al azar, con velocidades que en el caso de metales son del orden de unos miles de kilómetros por segundo, pero el valor medio de la densidad es el mismo en todos los puntos (*A*). Esta uniformidad es modificada cuando se excita una onda de plasma (*B*). La densidad varía entonces periódicamente en el espacio y esta variación periódica, a su vez, se propaga a medida que transcurre el tiempo. Esta onda de plasma es el resultado de un tipo de movimiento colectivo, que se superpone al caos individual. El mecanismo de este modo colectivo está explicado en *C*. Para que pueda organizarse una onda es siempre necesario que exista una interacción entre las partículas microscópicas que la integran. En este caso la interacción es la repulsión mutua de todas las cargas electrónicas. En las regiones de la onda periódica en que la densidad de carga es máxima (*MAX*) se crean fuerzas eléctricas (*F*) que tienden a disminuir esta alta concentración de cargas que se repelen entre sí. Esto arroja carga sobre las regiones de densidad mínima (*MIN*), de modo que unos instantes después (típicamente tiempos del orden de 10^{-15} segundos) los mínimos se han convertido en máximos y los máximos se han convertido en mínimos; las fuerzas eléctricas se invierten y se repite el proceso en sentido inverso, para luego empezar de nuevo. Estas fuerzas eléctricas actúan de fuerzas recuperadoras, y esto es lo que mantiene la oscilación colectiva.

asociado a la onda de plasma es la cuasipartícula llamada plasmón; su energía y momento valen también $h\nu$ y hk, donde ν y k son la frecuencia natural y el número de ondas de la oscilación. Típicamente $h\nu$ vale algunos electronvolt. [*véase la ilustración superior de esta página*].

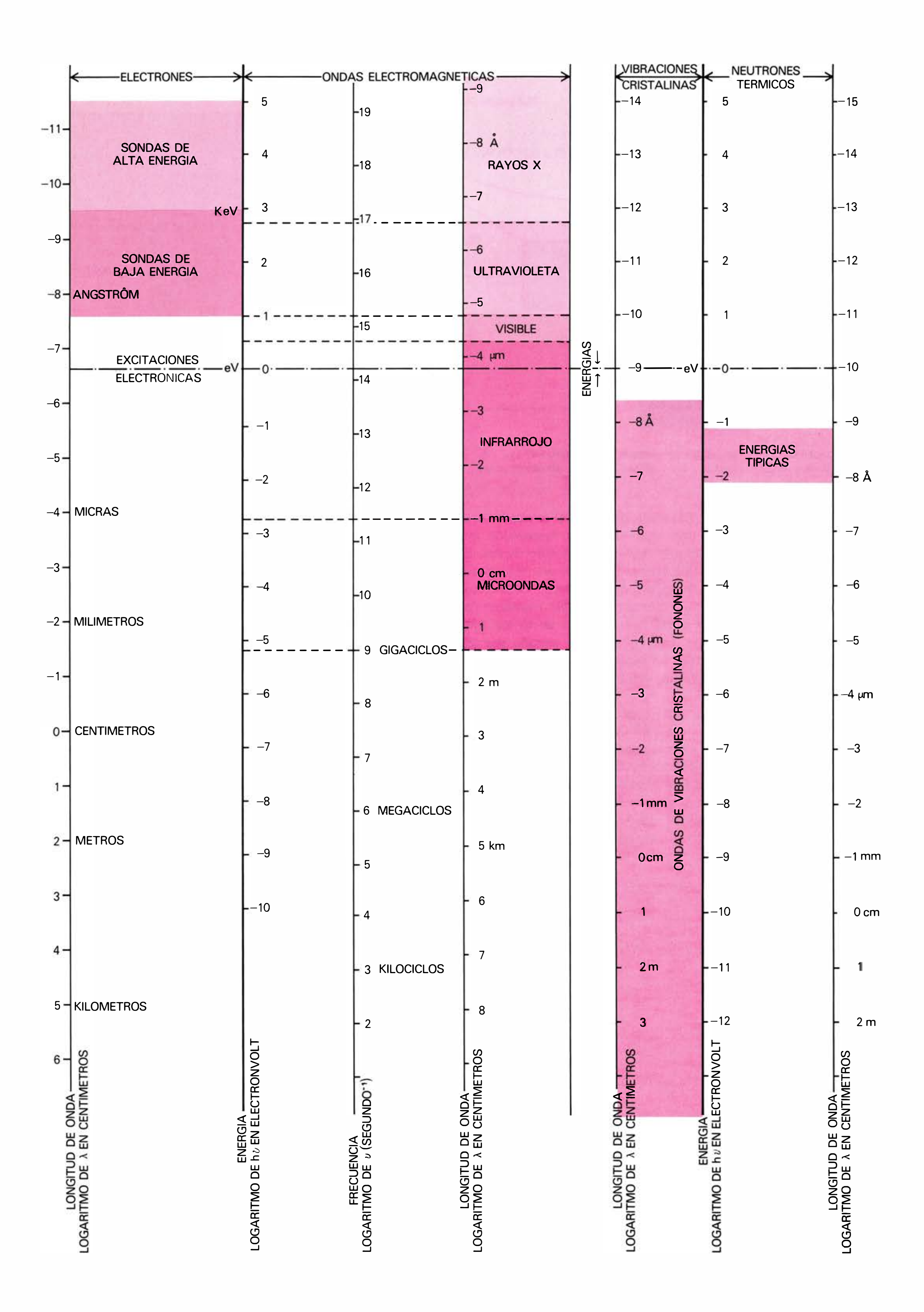
Con independencia del carácter colectivo que presentan los electrones en el plasmón, aquéllos también pueden observarse individualmente. El efecto fotoeléctrico (emisión de electrones de metales por absorción de radiación electromagnética) es el ejemplo mejor conocido de este caso. En esto se basa el funcionamiento de los dispositivos fotoeléctricos de uso común. En un sólido los electrones más externos de cada átomo son los responsables de la cohesión del material. En general, estos electrones participan de un gran enlace cristalino, de forma que podemos imaginar al sólido como una gran macromolécula con los electrones externos orbitando por todo el cristal. En estas condiciones, en vez de utilizar los números cuánticos atómicos —momento angular o spin— para describir el espectro electrónico, puede clasificarse este espectro mediante el número cuántico **k**, que define el momento cristalino $h\mathbf{k}$ del electrón (en tres dimensiones, el momento es un vector de tres componentes). De esta forma la relación $E(\mathbf{p})$ define el espectro electrónico del sólido, en analogía con el caso de fonones o plasmones.

Hemos indicado inicialmente que, en general, se obtiene información de un sistema bombardeándolo con sondas (en la vida diaria es la radiación de fotones la que nos transmite la máxima información sobre el mundo que nos rodea). La sonda puede consistir en ondas o partículas, aunque desde el punto de vista cuántico ambas descripciones son distintas manifestaciones del mismo fenómeno. Según el principio de dualidad onda-corpúsculo, una partícula de masa m, de momento $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ y de energía $E = p^2/2m$, presenta un comportamiento ondulatorio equivalente al de una onda de frecuencia $\nu = E/h$ y longitud de onda $\lambda = h/p$ (al introducir el fonón o el plasmón hemos utilizado el mismo principio). Así, el corpúsculo asociado a una onda electromagnética (ν, k) se llama "fotón". La radiación electromagnética puede ser concebida "como un gas de fotones". Las circunstancias en las que, de una misma entidad, predominen sus aspectos ondulatorios o corpusculares no nos conciernen mucho aquí. Lo que nos interesa es que tenemos conceptos unificadores que son útiles en la descripción que buscamos. Por ejemplo, si la sonda es radiación electromagnética que incide sobre un sólido, podemos imaginar un haz de fotones incidentes y estudiar interacciones fotón-electrón. O bien podemos estudiar la cuasipartícula asociada a las ondas de vibración en una red cristalina ("fonón") y estudiar las colisiones de neutrones incidentes, que excitan estas ondas de vibración, como interacciones neutrón-fonón. La ilustración de la página siguiente resume algunos valores representativos para las partículas y cuasipartículas típicas que entran en los fenómenos espectroscópicos discutidos en este artículo. Nótese que, para un valor dado de la energía, el valor asociado de la longitud de onda (y por tanto del momento) son diferentes según la partícula o cuasipartícula de que se trate.

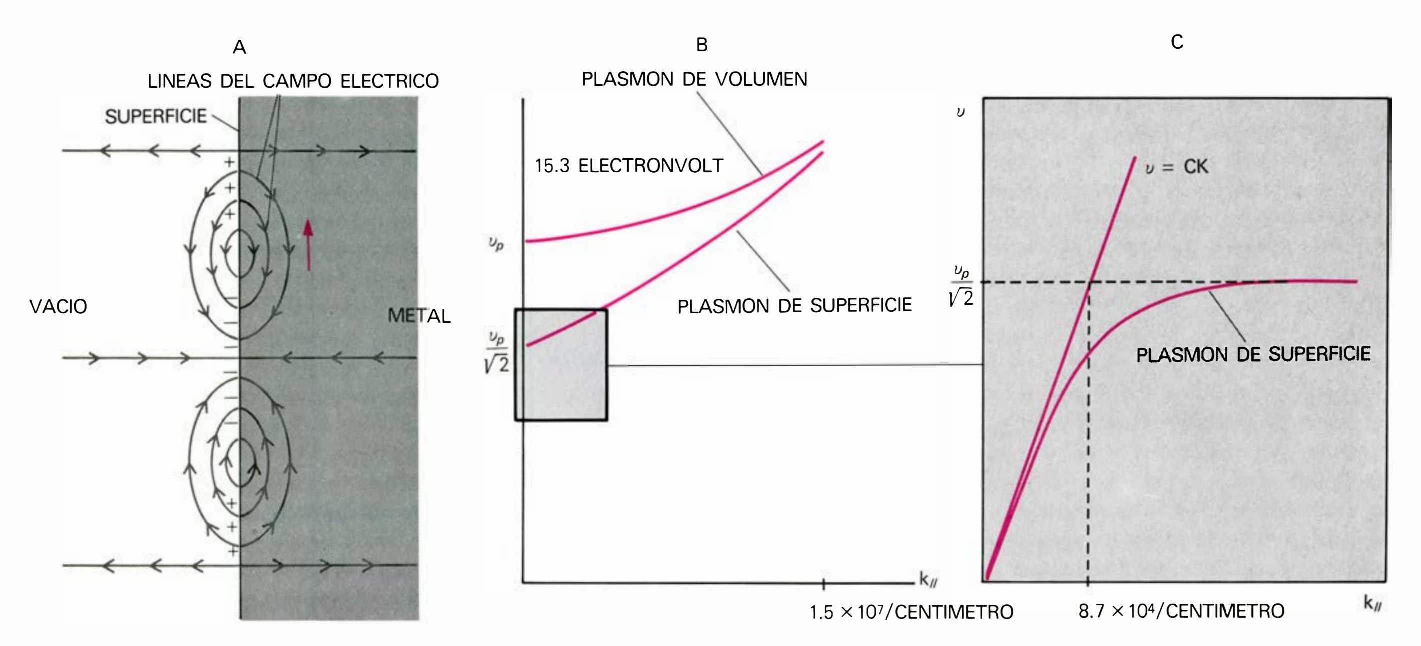
Veamos ahora los principios que intervienen en la espectroscopía de sólidos, donde las sondas incidentes entran en interacción con las cuasipartículas del medio. En primer lugar tiene que existir un posible mecanismo de interacción entre la sonda y las excitaciones, es decir, los modos normales del medio en estudio. Por ejemplo, los plasmones pueden excitarse con cargas externas incidentes sobre el sólido, y los fonones por medio de neutrones; en el caso de los plasmones, el acoplamiento se produce a través del campo eléctrico que crea un plasmón, mientras que en el caso de los fonones, el acoplamiento se debe a la interacción entre un neutrón y el núcleo de un átomo de la red.

Todos estos procesos de interacción están regidos por "principios de conser-

VALORES REPRESENTATIVOS DE LOS PARAMETROS DINAMICOS (energía, longitud de onda) de distintos tipos de partículas y cuasipartículas. Una unidad conveniente de energía es el electronvolt (eV), que sería el trabajo necesario para que la carga elemental de un electrón remontase una diferencia de potencial de un volt. (Para levantar 1 kilogramo a una altura de 1 metro desde el nivel del mar habría que hacer un trabajo de unos 6×10^{19} electronvolt. Una bombilla de 100 watt ardiendo durante 1 hora consume una energía de unos $2{,}2 \times 10^{24}$ eV.) Los valores están representados en escalas logarítmicas. Por ejemplo, un kiloelectronvolt (que se abrevia KeV) (10^3 eV) viene representado por el punto + 3 en la escala logarítmica de energías. Muchos de los fenómenos espectroscópicos de interés para el estudio de la materia sólida ocurren con energías en torno al orden de magnitud del electronvolt. El angström (A, 10^{-8} centímetros) es una unidad de longitud útil para estudiar fenómenos microscópicos en sólidos. Valores típicos de las distancias interatómicas son del orden de unos pocos A. Nótese la diferente posición del A relativa a la del eV en las escalas logarítmicas de distintas cuasipartículas. Abreviaciones usuales: *c* (ciclo, una oscilación por segundo), *M* (mega, 10^6), *G* (giga, 10^9), μ (micra, millonésima parte, $1\mu = 10^{-4}$ centímetros = 10^{-6} metros, es decir, una milésima de milímetro).



ELECTRONES
ONDAS ELECTROMAGNETICAS
VIBRACIONES CRISTALINAS
NEUTRONES TERMICOS
SONDAS DE ALTA ENERGIA
SONDAS DE BAJA ENERGIA
KeV
ANGSTRÖM
EXCITACIONES ELECTRONICAS
eV
MICRAS
MILIMETROS
CENTIMETROS
METROS
KILOMETROS
RAYOS X
ULTRAVIOLETA
VISIBLE
INFRARROJO
MICROONDAS
GIGACICLOS
MEGACICLOS
KILOCICLOS
8 Å
4 µm
1 mm
0 cm
2 m
5 km
ENERGIAS
ONDAS DE VIBRACIONES CRISTALINAS (FONONES)
ENERGIAS TIPICAS
LONGITUD DE ONDA LOGARITMO DE λ EN CENTIMETROS
ENERGIA LOGARITMO DE hν EN ELECTRONVOLT
FRECUENCIA LOGARITMO DE ν (SEGUNDO⁻¹)



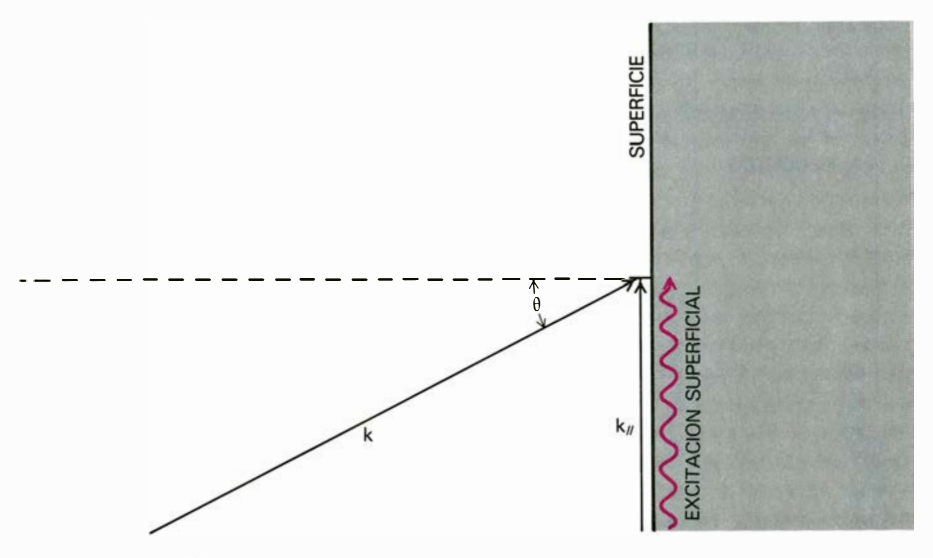
CAMPO eléctrico creado al excitar un plasmón de superficie (*A*). Los signos positivos y negativos indican las regiones donde se almacena carga positiva o negativa. La relación de dispersión para plasmones de superficie se muestra en *B*; en *C*, los efectos radiativos sobre la relación de dispersión.

vación". Uno es el de "conservación de la energía": la energía total tiene que ser la misma antes y después de producirse el proceso de interacción. Por ejemplo, si un electrón es excitado a un estado de energía más alta debido a la absorción de un fotón, la energía del electrón saliente (estado final) tiene que ser igual a la suma de la del electrón entrante (estado inicial) más la del fotón absorbido.

Otro principio de conservación está relacionado con un aspecto más sutil de la teoría física. En este caso, con la simetría de traslación cristalina. Hemos visto que esta simetría está asociada a la existencia de un momento cristalino **k** en la definición de las cuasipartículas del sólido. En las interacciones entre las sondas externas y las cuasipartículas del sólido, la suma del momento cristalino y el momento de los corpúsculos incidentes tiene que mantenerse. Por ejemplo, si un neutrón interacciona con un fonón, puede transferir un momento a éste, pero de forma que el momento cristalino ganado sea igual al momento perdido por el neutrón. Las cuasipartículas se comportan entonces como partículas de momento **k**.

Sin embargo, hay un matiz importante asociado al hecho de que realmente las cuasipartículas son cuantos de los modos de vibración del sólido. En este caso la red no tiene toda la simetría de traslación espacial. Para dejar la red igual no podemos aplicar una traslación cualquiera, sino solamente las "traslaciones cristalinas", propias de la red, que son las que llevan a los átomos de unos puntos a otros de ésta. Siendo de todos modos una simetría de tipo traslación, los números cuánticos asociados tienen también la naturaleza física de momentos, como hemos analizado antes; pero así como no todas las traslaciones son permitidas, tampoco todos los valores del momento son permitidos, sino solamente los que corresponden al llamado "momento cristalino". En el caso elemental que examinamos anteriormente sobre los fonones en una red unidimensional, esto significa que el momento sólo podía tomar valores entre $-h/2a$ y $h/2a$. Por otra parte, desde el punto de vista de la conservación del momento, esto introduce una modificación en esta ley, ya que si un fonón interacciona con un neutrón, por ejemplo, la ley de conservación del momento exige que el momento inicial del fonón y el neutrón sea igual al momento final, salvo una constante que, en este caso, puede ser cualquier múltiplo entero de h/a. Este efecto puede comprenderse desde un punto de vista ondulatorio imaginando a la cuasipartícula y a la sonda externa como ondas que se propagan en el cristal. Ahora la periodicidad cristalina actúa como una red de difracción que dispersa a las ondas anteriores. Esta difracción es la que cambia el momento ordinario (que correspondería a una onda propagándose en el vacío) en el cuasimomento cristalino. Resaltemos que ésta es la diferencia entre la cuasipartícula y la partícula.

Después de estas consideraciones ge-



UN FOTON incidente con ángulo θ sobre la superficie puede crear una excitación superficial de momento k = *k* senθ. Este es un caso particular de la ley de conservación del momento cristalino.

nerales, la ilustración de la página 23 puede servirnos para comprender los tipos de sondas que son posibles o útiles para estudiar distintos tipos de cuasipartículas y también la clase de información que los correspondientes experimentos pueden dar. Por ejemplo, la difracción de rayos X de longitudes de onda del orden del angström será muy acusada cuando éstos atraviesen redes cristalinas cuyas distancias interatómicas sean del mismo orden; por eso los rayos X son enormemente útiles para determinar estructuras cristalinas. En este artículo nos centramos en la descripción de las "estructuras dinámicas" (es decir, el espectro de excitaciones). Más que la estructura estática de la red cristalina nos interesa su espectro vibracional (fonones). Aunque no es imposible obtener algo de esta información estudiando con detalle la difracción "inelástica" (es decir, con ganancia o pérdida de energía) de rayos X, la inspección de la última columna de la ilustración de la página 23 permite comprender que es mucho más práctico bombardear con neutrones térmicos, que se producen en los reactores nucleares. Al igual que los rayos X, los neutrones también penetran a través de la materia sólida y sus características dinámicas los sitúan más en la región natural para el estudio de vibraciones cristalinas.

Los fotones constituyen una sonda muy práctica desde el punto de vista experimental. Producir luz, colimar (es decir, seleccionar bandas de frecuencia, o sea de energía), focalizar y bombardear objetivos con esta luz no presenta especiales dificultades. Es mucho más complicado y costoso montar, por ejemplo, un sistema para bombardear un sólido con haces de electrones. Pero de nuevo vemos en la ilustración de la página antedicha que, para iguales energías, los fotones tienen longitudes de onda más largas, lo que significa momento muy pequeño, mientras que los electrones incidentes tienen longitudes de onda más cortas. Así pues, si bien ambas sondas son posibles, los fotones son útiles cuando interesa información relativa a k pequeño (onda larga a escala de las distancias microscópicas en el interior del sólido), mientras que los experimentos con bombardeo por electrones pueden dar mejor información relativa a k grande.

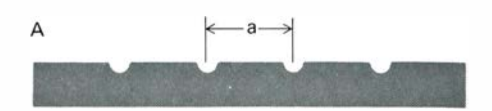
Hasta este punto hemos examinado brevemente el espectro de cuasipartículas asociado al volumen de un sólido. Hemos visto que el espectro se caracteriza esencialmente por el momento **k** y por la relación de dispersión $E(\mathbf{k})$. Veamos ahora lo que ocurre en la superficie de un cristal.

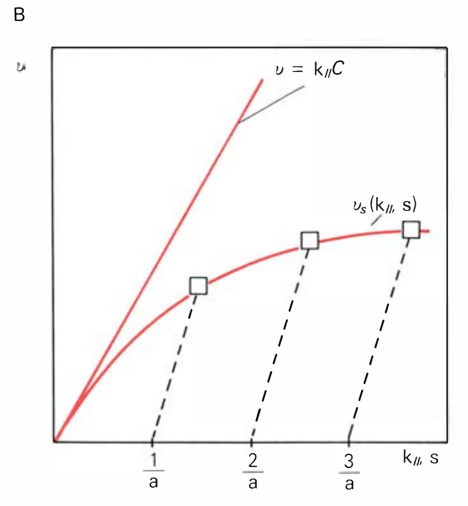
La simetría de traslación del volumen es la que permite introducir el momento cristalino tridimensional **k.** Al crear una superficie se rompe la simetría de traslación perpendicular a la superficie. El efecto fundamental de la nueva situación es que sólo las componentes del momento $\mathbf{k}_{||}$ paralelo a la superficie tienen ahora la naturaleza de números cuánticos para describir las excitaciones asociadas a la superficie. Ilustremos esto examinando algunas de las cuasipartículas típicas de superficies.

Empecemos con la vibración del plasma electrónico, estudiando ahora el "plasmón de superficie". En este caso la carga de, digamos, un metal normal oscila cerca de la superficie creando el campo eléctrico que se muestra en la ilustración superior de la página precedente. Ahora no aparece una oscilación de carga en todo el cristal, como en el plasmón de volumen, ya que sólo se tiene carga inducida cerca de la propia superficie. Esta carga crea un campo eléctrico que varía periódicamente en el sentido paralelo a la superficie, pero su amplitud decrece exponencialmente en función de la distancia a la misma.

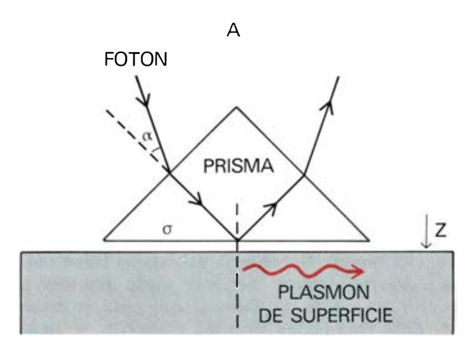
La oscilación del plasma superficial consiste, pues, en una variación de la carga inducida cerca de la superficie; esta carga crea, a su vez, un campo que tiende a oponerse a la propia variación existente de carga. El modo es el resultado de la oscilación entre la energía electrostática y la energía cinética de los electrones cerca de la superficie.

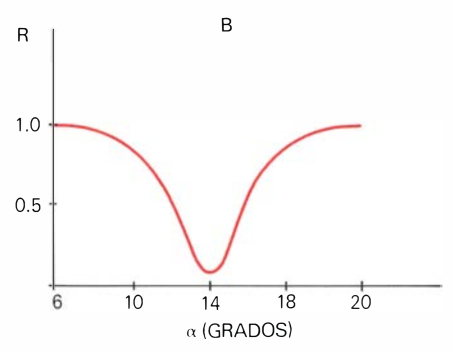
Es interesante notar que existen diferentes modos de vibración que dependen del momento $\mathbf{k}_{||}$; la oscilación de carga varía como $\cos [2\pi (k_{||}y - v_s t)]$, donde y es la dirección definida en la ilustración superior de la página precedente (A); aquí $k_{||}$ es el número cuántico (bidimensional) asociado a la nueva cuasipartícula y v_s la frecuencia del plasmón de superficie. Conocer el espectro de energías de esta cuasipartícula es conocer la función $v_s(k_{||})$ que define la frecuencia v_s para cada $k_{||}$. En esa misma ilustración (B), se dibuja este espectro para el caso del aluminio junto con el espectro del plasmón de volumen. Es interesante resaltar que v_s es menor que la frecuencia de los modos de volumen. Esta es una característica que se presenta frecuentemente en problemas de superficie; en nuestro caso, es el resultado de que al formar la superficie y eliminar medio cristal disminuye la res-





RAYADO periódico que se hace en la superficie para excitar plasmones con un campo electromagnético (*A*). En *B* se dibuja la solución gráfica de las ecuaciones $\mathbf{k}_{||,s} = k \operatorname{sen}\theta + (n/a)$ y $\nu_s = \nu$, que representan las leyes de conservación de energía y momento de las ecuaciones $\nu = kc$ y $\nu_s = \nu_s(k_{||,s})$ que dan las relaciones de dispersión de los fotones y los plasmones de superficie. Las soluciones □ dan los valores ν_s y $\mathbf{k}_{||,s}$ de los plasmones excitados por los fotones incidentes con θ.

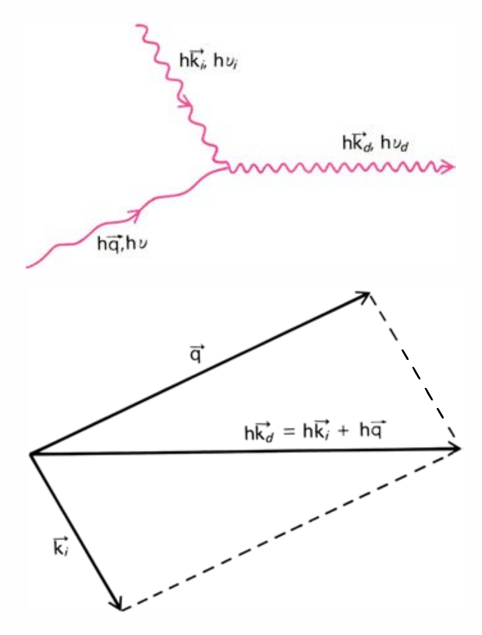




EN EL ESQUEMA EXPERIMENTAL de la figura se hace incidir un haz de fotones sobre un prisma, de forma que el campo electromagnético sufre una reflexión total en la superficie σ (*A*). Más allá de esta superficie se crea un campo electromagnético que decrece exponencialmente como $e^{-2\pi hz}$. Abajo (*B*), se dibuja la reflectividad del campo electromagnético para el esquema dibujado en *A*, como función del ángulo α. El mínimo en *R* corresponde a la excitación de un plasmón de superficie. Datos correspondientes al metal plata (Ag) para radiación incidente de 0,406 μ, tomados de A. Otto, *Z. Phys.*, *216*, 398 (1968).

puesta global del sistema, ablandándose los modos de vibración próximos a la superficie.

En la discusión anterior se ha supuesto que las cargas en movimiento sólo crean un campo coulombiano. En otras palabras, se han despreciado los efectos radiativos asociados al movimiento de cargas. En rigor, las cargas en movimiento pueden crear también un campo magnético, lo que modifica en parte el análisis anterior. Estas correcciones sólo tienen importancia en la región radiativa, esto es, en aquella región del espectro donde la relación entre ν y $k_{||}$ es próxima a $\nu = k_{||}c$, la relación de dispersión de los fotones. En esta región, los efectos radiativos son primordiales y el análisis del plasmón de superficie debe rehacerse adecuadamente. En la misma ilustración, (*C*), puede verse la corrección que aparece y que se encuentra localizada cerca del origen de momentos, $k_{||}$. El efecto primordial consiste en deformar la relación de dispersión como indica la citada figura que venimos hasta ahora explicando.



DESCRIPCION corpuscular de un fenómeno de difracción inelástica de luz. La luz es difractada por una fluctuación (onda) de frecuencia ν y vector de onda q. Esto es lo mismo que decir que un fotón incidente, de momento $h\mathbf{k}$ y energía $h\nu_i$ absorbe un cuanto de momento $h\mathbf{q}$ y energía $h\nu$, con lo que se convierte en un fotón con momento $h\mathbf{k}_d$ y energía $h\nu_d$. Los principios de conservación de energía y momento requieren que el electrón difractado tenga energía $h\nu_d = h\nu_i + h\nu$ y momento $h\mathbf{k}_d = h\mathbf{k}_i + h\mathbf{q}$. Esto es lo mismo que decir que $\mathbf{k}_d = \mathbf{k}_i + \mathbf{q}$ y $\nu_d = \nu_i + \nu$, que constituye la versión ondulatoria del mismo fenómeno. En general el fotón incidente puede absorber o emitir un cuanto (q), de modo que para procesos de difracción inelástica como el descrito se tiene en general que $k_d = k_i \pm q$ y $\nu_d = \nu_i \pm \nu$.

¿Cómo estudiar espectroscópicamente los plasmones de superficie? En principio, podría utilizarse como fuente externa un haz de cargas –electrones, por ejemplo– o un haz de fotones. El campo eléctrico que se crea de este modo actúa sobre los electrones del metal y los pone en movimiento, estimulando la vibración del plasmón de superficie.

Sin embargo, en el caso de un fotón incidente sobre la superficie, las reglas de conservación prohíben la excitación del plasmón. Esto se explica así: en el caso del fotón incidente la frecuencia y el número de ondas guardan la relación $\nu = kc$. Por otra parte, las leyes de conservación nos dicen que la frecuencia ν_s y el número de ondas $k_{||,s}$ del plasmón de superficie deben valer

$$\nu_s = \nu$$

$$k_{||,s} = k \operatorname{sen}\theta,$$

donde θ es el ángulo entre el fotón incidente y la superficie [*véase la ilustración inferior de la página 24*]. Estas relaciones exigen que sea

$$\nu_s / \mathrm{k}_{||,s} = \frac{\nu}{\mathrm{k} \operatorname{sen} \theta} = \frac{\mathrm{c}}{\operatorname{sen} \theta}.$$

Ahora bien, mirando la ilustración superior de la página 24 (*C*), podemos ver que no hay ningún valor de ν_s y $k_{||,s}$ que cumplan esta relación.

A pesar de estos comentarios, existen varios trucos experimentales que permiten observar el plasmón por medio de fotones. En un caso, la superficie se raya, creando una periodicidad artificial. En estas condiciones el momento cristalino paralelo a la superficie presenta la indefinición según múltiplos de $1/a$, como indicamos antes en tres dimensiones, de manera que la condición de conservación $k_{||,s} = k \operatorname{sen}\theta$ toma ahora la forma

$$k_{||,s} = k \operatorname{sen}\theta \pm \frac{1}{a} n.$$

Esta ecuación y la que resulta de la conservación de la energía, $\nu_s = \nu$, permite obtener los valores de ν_s y $k_{||,s}$ para los plasmones que son ahora excitados por los fotones [*véase la ilustración superior de la página precedente*].

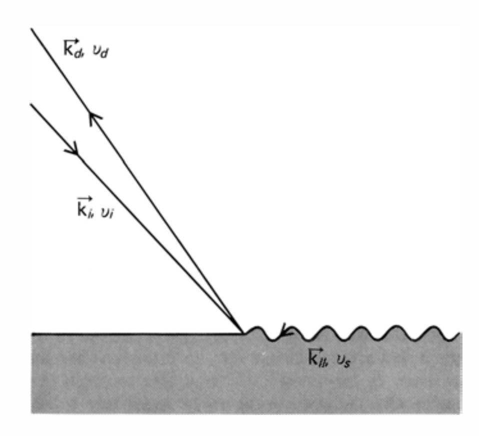
Otra manera de excitar plasmones de superficie con fotones es utilizar el campo electromagnético que se crea más allá de la superficie de un prisma con reflexión total [*véase la ilustración inferior de la página anterior*]. De esta forma se tiene un campo incidente en el metal, que decae como $e^{-2\pi kz}$. Esto equivale a un campo que tiene imaginario el momento perpendicular a la superficie; al ser $i^2 = -1$, $e^{-2\pi hz} = e^{i2\pi(ih)z}$. En estas condiciones, el momento paralelo $\mathbf{k}_{||}$ transferido al plasmón es mayor que k, ya que

$$k^2 = k_{||}^2 + k_{\perp}^2 = k_{||}^2 - h^2$$

Esto permite excitar un plasmón de superficie. En la ilustración inferior (*B*) de la página precedente, se dibuja la reflectividad del campo electromagnético medida con el esquema superior (*A*) de esa misma ilustración. El mínimo en *R* aparece por la pérdida de energía electromagnética al excitarse los plasmones de superficie.

Con fotones, sin embargo, sólo puede medirse aquella parte del espectro de plasmones de superficie que tiene $k_{||}$ muy pequeño. Una medida del espectro para valores grandes de $k_{||}$ puede conseguirse con electrones incidiendo sobre la superficie. En este caso el campo que crea la carga en movimiento pone en vibración la carga metálica, excitando los plasmones de superficie. De esta forma, midiendo la energía y el momento perdidos por los electrones puede obtenerse el correspondiente espectro de excitación.

Volvamos ahora a las ondas de vibración elástica (fonones) e introduzcamos la superficie. En realidad, los experimentos de los que nos vamos a ocupar tienen lugar en el dominio de longitudes de onda muy largas comparadas con las distancias interatómicas. En este límite podemos tratar al sólido cristalino como si fuera un medio elástico continuo. Hablaremos, pues, de ondas elásticas superficiales. Estas ondas tienen una componente de oscilación longitudinal y una componente de oscilación transversal. Para estudiar este tipo de excitación se puede también utilizar luz incidente



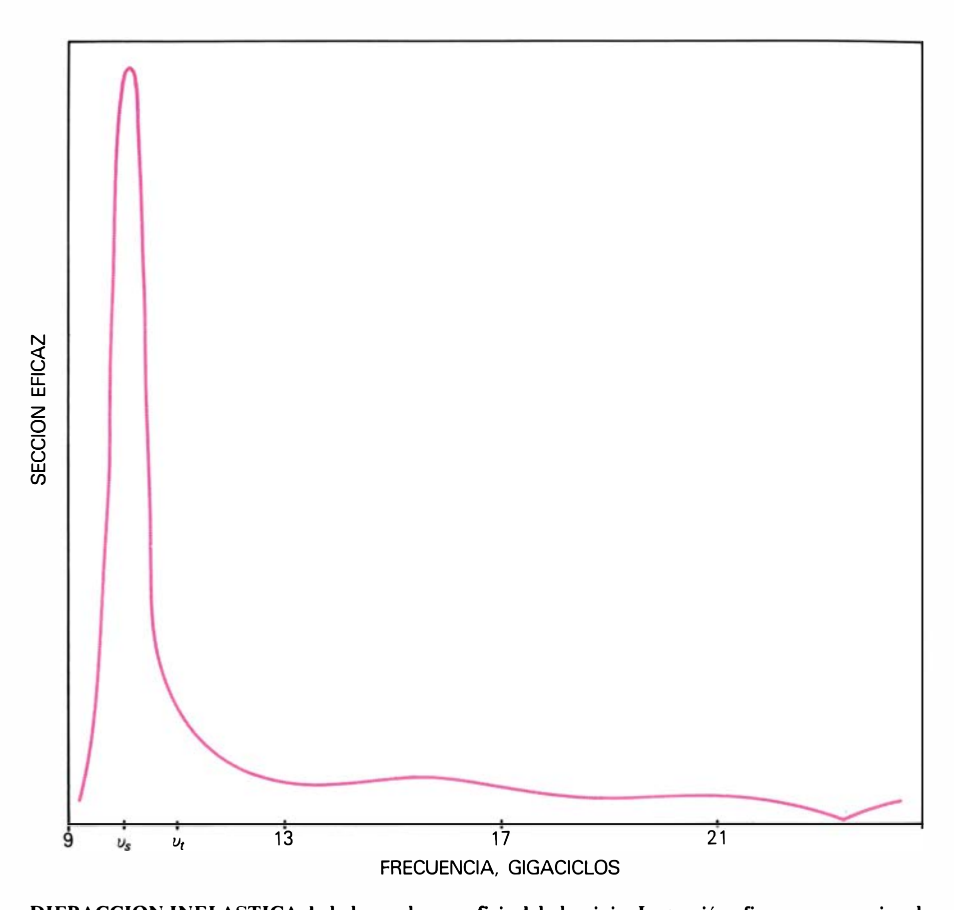
ESQUEMA de un experimento de reflexión en que se estudia la difracción inelástica de la luz (llamada difracción de Brillouin) debida a ondas acústicas superficiales. Se manda una determinada intensidad de fotones incidentes en una dirección (con frecuencia ν_i) y se mide la intensidad de fotones difractados en otro intervalo de direcciones y frecuencias. Se dice que se ha medido la sección eficaz para el proceso $(\mathbf{k}_i, \nu_i) \rightarrow (\mathbf{k}_d, \nu_d)$.

sobre la superficie. Es interesante ver el fundamento de este tipo de experimento por las nuevas ideas físicas que ello ilustra. De nuevo es necesario considerar primero lo que ocurre en el volumen. Una propiedad óptica característica de un medio material es su "índice de refracción", que determina cómo la luz se propaga a su través. En los casos más sencillos esto puede reducirse simplemente a un cambio en la velocidad de propagación. En casos más complicados puede modificar la misma manera de propagarse.

Ahora imaginemos que la luz se propaga a través de un medio en el que hay algún tipo de fluctuación que puede acoplarse al campo electromagnético. Entre los dos fenómenos ondulatorios hay entonces fuertes efectos de interferencia que producen una "difracción" de la luz. Esta difracción puede desviar la trayectoria de un haz luminoso incidente y también cambiar su frecuencia. El mismo fenómeno puede describirse desde el punto de vista corpuscular [*véase la ilustración superior de la página precedente*], diciendo que un fotón incidente absorbe (o emite, según sea el caso) un cuanto de la fluctuación de "vector de onda" **q** y frecuencia v. En el experimento espectroscópico se hace incidir luz de una determinada frecuencia (o gama de frecuencias) en una determinada dirección y se monta un detector que registre la intensidad luminosa emitida en otra dirección y en otras frecuencias. Según los distintos mecanismos físicos de acoplo pueden darse fenómenos muy diversos. Las ondas de polarización eléctrica en un dieléctrico, por ejemplo, pueden difractar la luz, pero aquí nos limitaremos a describir sólo uno de estos fenómenos en relación con las ondas elásticas de superficie.

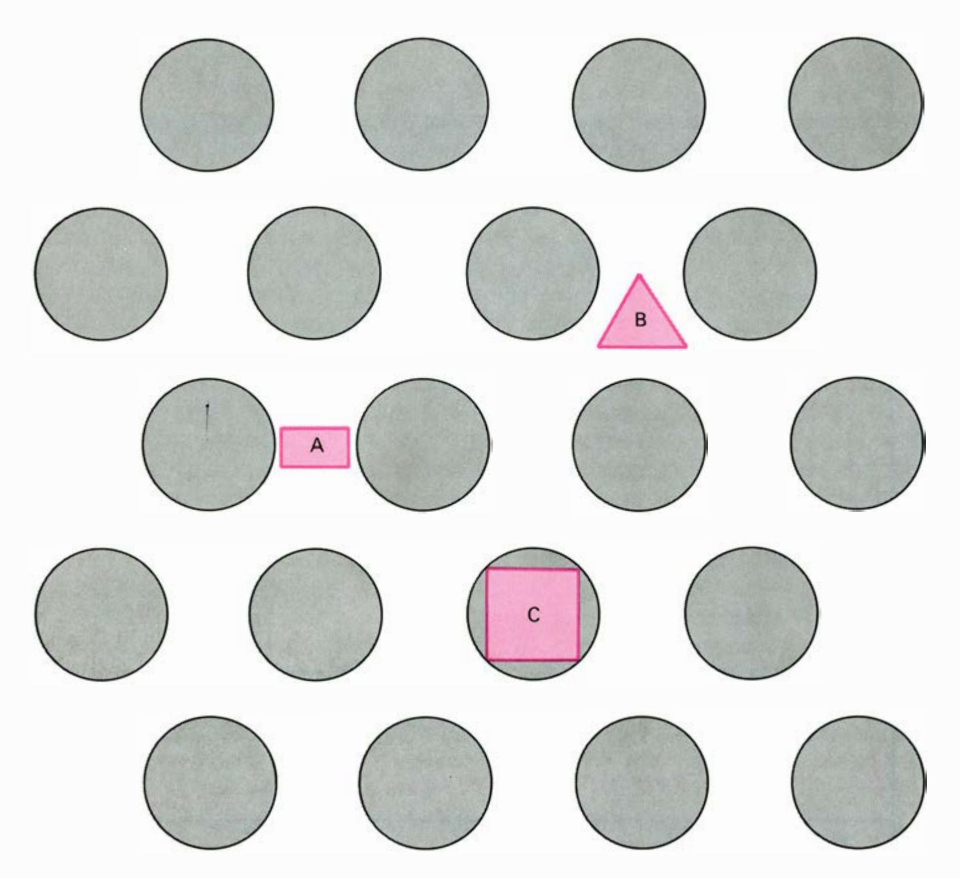
En general, las ondas elásticas pueden acoplarse a la luz porque pueden producir una variación periódica de densidad con zonas alternadas de compresión y dilatación que varían periódicamente en el espacio y en el tiempo. El índice de refracción de un medio material depende, entre otros factores, de su densidad, de modo que la variación periódica de densidad de la onda elástica produce una modulación periódica del índice de refracción y esto puede causar difracción inelástica de la luz. En términos corpusculares [*véase la misma ilustración*], un fotón incidente puede absorber (o emitir) un fonón de tipo acústico ("efecto elasto-óptico").

Ahora pensemos en una superficie. Si el experimento se hace por reflexión, y no por transmisión, entonces se obtiene



DIFRACCION INELASTICA de la luz en la superficie del aluminio. La sección eficaz es proporcional (en unidades que no necesitan ser especificadas aquí) a la intensidad de fotones reflejados en una dirección fija en función de la frecuencia. Para una frecuencia incidente dada, el eje horizontal representa la diferencia de frecuencias ν_d (difractada) − ν_i (incidente). Este número mide la frecuencia de la onda que ha intervenido y puede ser positivo o negativo, según que haya habido absorción o emisión de un cuanto (fonón) de onda. La situación es la siguiente: la luz incidente tiene frecuencias comparativamente altas, del orden de 10^{15} hertz (ciclos por segundo; zona visible del espectro). El detector de luz reflejada barre una zona de frecuencias a ambos lados de ν_i (en la figura se representa sólo la parte en que $\nu_d - \nu_i$ es positiva). Nótese la extremada finura del experimento. El cambio en frecuencia que hay que detectar es cinco o seis órdenes de magnitud menor que la frecuencia incidente, porque las ondas superficiales que intervienen en este experimento tienen frecuencias del orden de gigaciclos. Es decir, hay que detectar frecuencias salientes que difieren de las frecuencias entrantes en una millonésima parte o menos. Los datos se han tomado de J. R. Sandercock, *Solid. Stat. Commun.*, *26*, 547 (1978).

información sobre la manera de vibrar el medio en la vecindad de la superficie. La idea de un experimento de este tipo está indicada en la ilustración inferior de la página opuesta. La magnitud medida en este tipo de experimento se llama "sección eficaz" y en general es una función de la dirección y la frecuencia. Se suele trabajar a dirección fija y entonces se da la sección eficaz en función de la frecuencia. La forma de los resultados dependerá, naturalmente, de las frecuencias de los modos superficiales que dan lugar a esta difracción. Veamos ahora cuál es la situación en un metal típico, por ejemplo. Los metales son altamente reflectantes, de modo que la luz no penetra en el medio lo suficiente para interaccionar con la modulación periódica del índice de refracción asociada a la parte compresional y dilatacional de la onda de superficie. Pero la luz incidente encuentra una superficie ondulada. En la ilustración superior de dos páginas más arriba, vimos un ejemplo de superficie no plana que modifica la ley de conservación del momento $\mathbf{k}_{||}$. Lo mismo ocurrirá si la superficie tuviera, por ejemplo, forma sinusoidal (como un tejado de uralita). Podemos decir que una superficie de este tipo puede "comunicar momento" $\mathbf{k}_{||}$. La misma situación se presenta cuando en la superficie se propaga una onda elástica, sólo que ahora se trata de una situación dinámica. La ondulación de la superficie es el rizo que produce la onda a su paso y esta onda tiene (y puede comunicar) energía y momento. El índice de refracción que encuentra la luz incidente es igual al del vacío (o, lo que es lo mismo a efectos prácticos, al del aire) fuera de la superficie e igual al del metal dentro de ésta, y todo ello está variando periódicamente en el espacio y en el tiempo. El rizo produce una modulación periódica del índice de refracción que encuentra la radiación electromagnética y esto



SUPERFICIE CRISTALINA DE LA CARA DE EXFOLIACION del platino (Pt). En esta cara, los átomos de Pt se sitúan según una simetría hexagonal. Un átomo o una molécula de hidrógeno que se quimisorba en la superficie puede ocupar distintas posiciones geométricas. Las posiciones más probables son: (*A*) la posición puente entre átomos, (*B*) la posición central y (*C*) la posición sobre un átomo. La evidencia espectroscópica sugiere que el hidrógeno se quimisorbe atómicamente en la posición (*B*).

suministra otro mecanismo de interacción que produce difracción inelástica de la luz.

La ilustración de esta página muestra los resultados de un experimento de este tipo realizado con aluminio. El pico principal representa una acumulación fuerte de fotones salientes con una frecuencia que excede a la de los fotones entrantes en una cantidad igual precisamente a la frecuencia ν_s de la onda superficial en este caso absorbida. El experimento también permite medir el cambio en longitud de onda, es decir, el número de ondas $k_{||}$ de la onda superficial. Puesto que $\nu_s = v_s k_{||}$, de la posición de este pico se deduce la velocidad de propagación v_s de las ondas superficiales. El espectro de difracción en realidad contiene más información. Además de las ondas superficiales, en la muestra material objeto del experimento hay también ondas de volumen, cuyas frecuencias empiezan en los umbrales ν_T (transversal) y ν_L (longitudinal). Estas ondas son también modificadas cerca de la superficie. La difracción inelástica de la luz da también información sobre estos cambios en el espectro de ondas elásticas de volumen en la banda de frecuencias entre ν_T y ν_L. Los detalles contenidos en una curva experimental como ésta son de gran interés para la investigación básica de ondas de superficie y efectos asociados y esto a su vez tiene un gran interés de aplicación práctica en la microelectrónica de estado sólido, gracias a la cual se ha llegado en tecnología de la información a una revolución fantástica que hace unos años hubiera sido imposible de imaginar.

Hasta el momento hemos estado investigando algunas de las propiedades físicas asociadas a una superficie sólida limpia. Sin embargo, un aspecto muy importante de las superficies es su relación con la quimisorción y la catálisis. Entonces interesa estudiar las distintas especies atómicas y moleculares que pueden ser adsorbidas sobre la última capa cristalina. Por ejemplo, es bien conocida la importancia del platino (Pt) como catalizador de la reacción de hidrógeno y oxígeno para formar agua; sin embargo, en éste como en muchos otros casos aún no puede explicarse cómo y por qué es precisamente un material el que favorece cierta reacción química. Entender estos procesos permitiría el diseño de catalizadores apropiados de interés industrial. Como paso previo al estudio del proceso catalítico, una parte importante de la investigación física actual en superficies sólidas se dirige a entender cómo son los procesos de quimisorción más simples asociados a las especies atómicas, como el H, o a las especies moleculares, como el CO. Para dar una idea elemental de esta situación nos referiremos a continuación al caso de la quimisorción de hidrógeno en una superficie de Pt.

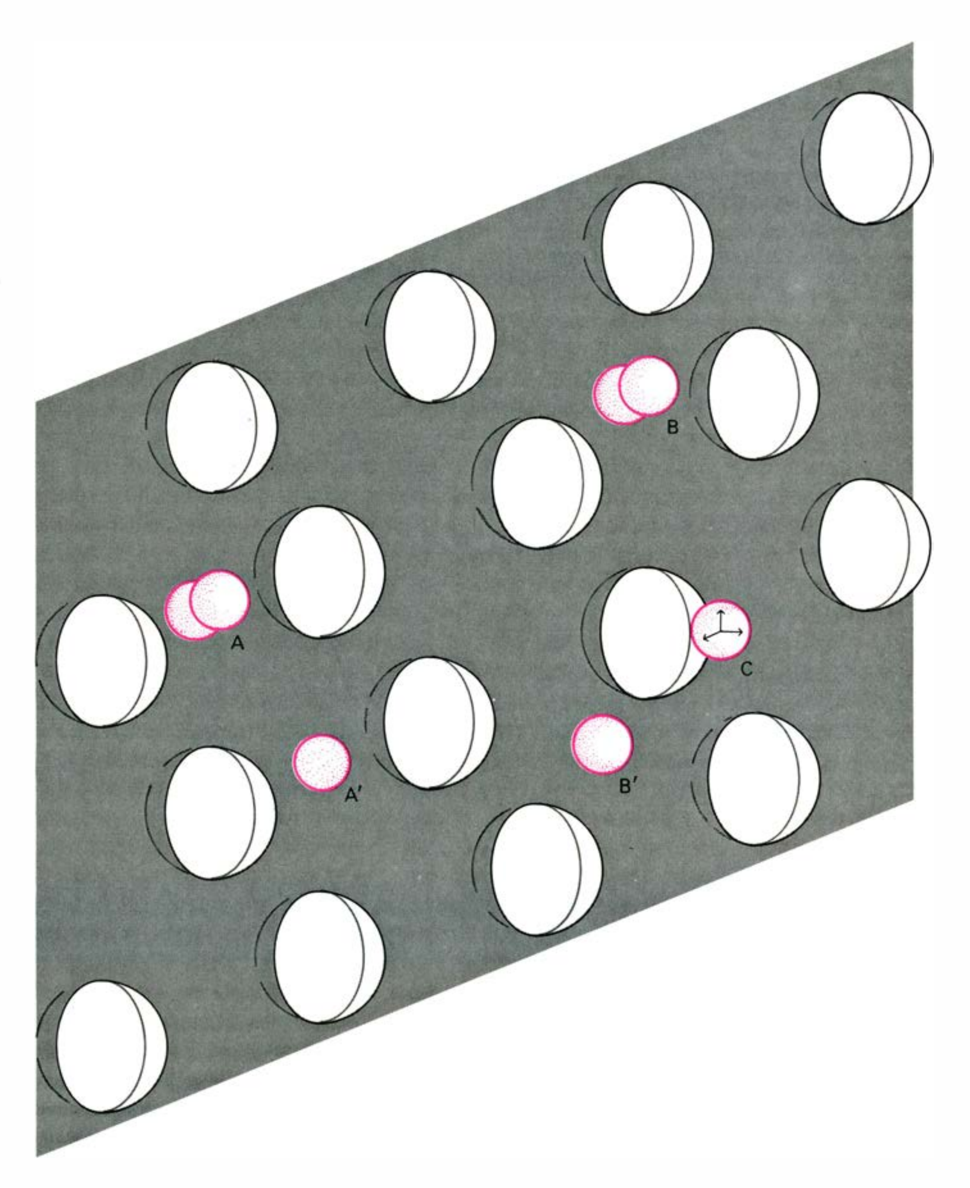
En la ilustración de la izquierda se dibuja la última capa cristalina de la cara de exfoliación natural del Pt, sobre la que supondremos que se absorbe hidrógeno que, en la fase gaseosa, se encuentra formando moléculas H_2 Estas moléculas inciden sobre la superficie, de forma que unas se quedan en ella y otras son reflejadas. Aún sabemos muy poco sobre cómo se realiza este proceso. Sin embargo, por medio de diferentes métodos espectroscópicos, puede llegar a determinarse si el hidrógeno se quimisorbe en forma molecular (H_2) o en forma atómica (H), para lo cual se tiene que romper el enlace de la molécula por su interacción con la superficie. Aún más, actualmente puede llegar a conocerse en qué posición geométrica se deposita el hidrógeno.

El análisis espectroscópico para determinar la forma quimisorbible del hidrógeno consiste, como siempre, en estudiar sus modos normales, en este caso los modos de vibración atómica asociados a la especie absorbida. Estamos en la misma situación que hemos encontrado en el estudio de la superficie limpia, pero los detalles son diferentes. Las excitaciones elementales en estudio no son ahora cuasipartículas con momento (cristalino) asociado a las traslaciones, sino excitaciones localizadas. Pero la simetría de estos modos vibracionales es también muy importante. En la ilustración de la página siguiente se indican posibles configuraciones geométricas de la molécula o del átomo en la superficie. En estas condiciones, la molécula del caso *A* o *B* presentará un modo de vibración de sus átomos que será parecido al de la molécula libre, mientras que en el caso *C* sólo aparecerán nuevos modos de vibración asociados a los desplazamientos del H en el sentido paralelo o perpendicular a la superficie. Determinando estas frecuencias de vibración puede saberse, en primer lugar, si tenemos una molécula o sólo el átomo absorbido en la superficie; pero aún más, puede también conocerse en qué posición se sitúa la especie química. Consideremos, por ejemplo, la diferencia entre el caso *A'* y *B'* de esa ilustra-

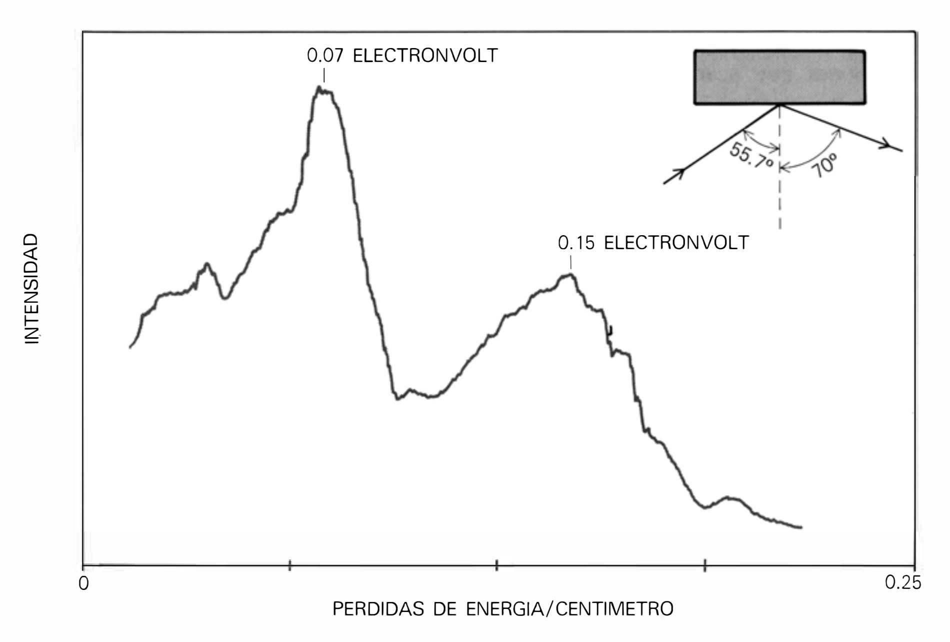
ción: en el caso A' el átomo presenta tres modos de vibración distintos, uno perpendicular y dos paralelos a la superficie; sin embargo, en el caso B', debido a la mayor simetría, los dos modos paralelos a la superficie tienen la misma frecuencia de vibración. Midiendo el número de modos de vibración diferentes puede descartarse una u otra posición.

Los modos de vibración pueden observarse con distintas técnicas espectroscópicas; la más precisa hasta el momento ha consistido en el uso de electrones que se hacen incidir y son reflejados en la superficie. La excitación de los modos puede hacerse a través de dos procesos: (*a*) por impacto directo del electrón incidente con el átomo o molécula, o (*b*) por interacción de la carga del electrón con el campo eléctrico que la especie quimisorbida crea en su vibración. En la ilustración superior de la página siguiente se dibuja el espectro de las intensidades reflejadas, en función de la energía perdida, cuando se hacen incidir los electrones a 56 grados y se observa su intensidad saliente a 70 grados con respecto a la normal a una superficie de Pt con hidrógeno absorbido. La energía perdida por los electrones es la gastada en excitar vibraciones de la especie adsorbida. En este espectro se observan las dos frecuencias características de $1{,}65 \times 10^{13}$ y $3{,}70 \times 10^{13}$ ciclos, que son claramente diferentes de la frecuencia de $1{,}31 \times 10^{14}$ ciclos que corresponde a la molécula H_2. Por otra parte, el número de modos que se observan y argumentos de otro tipo que no discutiremos aquí terminan por indicar que el hidrógeno se quimisorbe en forma atómica sobre la superficie del Pt y que se coloca en la posición central (B) indicada en la ilustración de la página precedente.

Es fácil comprender en términos intuitivos (aunque muy difícil de explicar en detalle) la relación que tiene el fenómeno catalítico con la quimisorción. Imaginemos una especie química A que puede disociarse en dos productos, $B + C$, y supongamos que estamos interesados en romper la molécula A (por ejemplo, isopropanol) para obtener los productos $B + C$ (acetona + hidrógeno). El sistema disociado ($B + C$) tiene una energía más baja que la molécula sin disociar [*véase la ilustración inferior de la página siguiente*], pero ésta no se disocia porque para ello tiene que pasar por una situación intermedia ("activada") de energía más alta. Hay que vencer la barrera de activación $E^*_g - E_{ig}$. La única manera es calentar. En la práctica esto suele suponer temperaturas muy elevadas, lo que es muy caro y también indeseable por las complicaciones que acarrea. El ideal sería buscar un "camino de reacción" que no tuviera que vencer una barrera de activación tan alta. Este es el papel del catalizador. Hay superficies sólidas que pueden adsorber las moléculas A [*véase la ilustración inferior de la página siguiente*]. Es intuitivamente claro que la molécula quimisorbida forma enlaces con la superficie y esto puede relajar los enlaces internos que de esta manera se pueden romper con más facilidad. El camino de reacción es entonces indirecto: primero hay quimisorción. La molécula quimisorbida se encuentra entonces en un nivel de energía inicial E_{ia}. La barrera de activación es ahora menor, con lo que la disociación tiene lugar con mayor facilidad. Si los productos disociados ($B + C$) se desorben, hemos ido de la misma situación inicial a la misma situación final por un camino distinto, pasando por una barrera de activación más pequeña. Los detalles en la realidad práctica son más complicados, pero en esencia este sencillo modelo permite comprender los aspectos fundamentales del problema: la quimisorción es un paso imprescindible. La forma como ésta se realiza, los tipos de enlaces que tienen lugar y las energías que entran en juego (así como la facilidad que un sólido dado tenga para absorber y desorber unas especies dadas) son los factores determinantes de la "actividad catalítica" de un catalizador particular. Por el inmenso interés industrial que tiene el fenómeno catalítico, se han invertido ingentes recursos en su estudio. Se conoce mucho, pero casi todo es empirismo guiado por expertos. Para llegar a dilucidar el mecanismo íntimo de estos fenómenos y poder "diseñar" sin una inves-



POSIBLES CONFIGURACIONES geométricas del hidrógeno adsorbido como molécula o como átomo sobre la superficie del Pt, según las posiciones *A*, *B* o *C* de la ilustración precedente. En el caso *C* se indican los posibles modos de vibración del átomo quimisorbido, con desplazamientos paralelos o perpendiculares a la superficie. Las frecuencias de vibración dan la posición de la especie química.



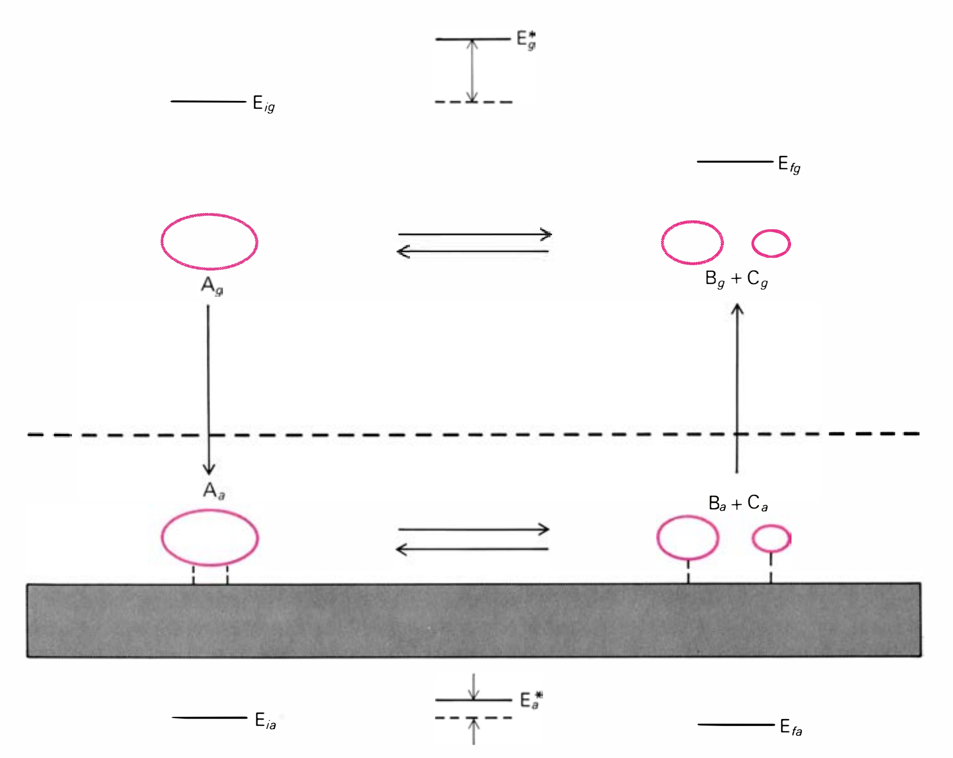
ESPECTRO DE INTENSIDADES del haz de electrones reflejado por la superficie del Pt con hidrógeno quimisorbido. En abscisas se toman las pérdidas de energía de los electrones reflejados para los ángulos incidente y reflejado indicados. Datos tomados de A. Baró, H. Ibach y H. D. Bruchmann.

tigación empírica tan costosa un catalizador adecuado a la reacción química que se desea, será absolutamente necesario hacer una investigación fundamental sobre las interacciones entre las superficies sólidas y las especies gaseosas. En esta investigación desempeñarán un papel central conceptos básicos como los que hemos intentado describir aquí.

Por ejemplo, la interacción de una molécula con la superficie del sólido puede empezar incluso antes de que se haya producido el enlace de quimisorción. Una molécula es un sistema de cargas eléctricas y cuando está cerca de la superficie de un sólido puede excitar modos normales de éste, como los plasmones. El campo eléctrico creado por éstos actúa a su vez sobre la molécula y ello puede producir cambios importantes en sus enlaces internos. Hay indicios de que éste es en algunos casos el mecanismo principalmente responsable de la ruptura de enlaces moleculares. En cualquier caso, la situación interna de la molécula puede estar significativamente afectada por procesos como el de excitación de plasmones, lo que a su vez influye en los complicados fenómenos que tienen lugar en la fase absorbida. He aquí un ejemplo en que conceptos aparentemente abstractos y formales desempeñan un papel central en la interpretación de un tipo de proceso que usan con provecho las industrias químicas. Se trata de un campo de incalculable interés tecnológico que presenta un desafío científico de primer orden.

En este artículo hemos descrito una pequeña fracción de la gran variedad fenomenológica que presenta el estudio de superficies sólidas. Las excitaciones que hemos descrito, y muchas más que también pueden producirse, juegan un papel importante en la física de las superficies limpias, de las superficies con especies quimisorbidas y de las interfases (superficie de contacto entre dos medios diferentes, muy importante en electrónica de estado sólido). Como campo del conocimiento básico, la física de superficies incide directamente sobre otros campos muy importantes de la ciencia que ya comentamos en la introducción. Las aplicaciones tecnológicas son también numerosas e importantes, como hemos visto.

La década que acaba de terminar ha presenciado un avance espectacular en el desarrollo de técnicas experimentales muy poderosas. Las técnicas espectroscópicas que hemos descrito, y otras semejantes, han desempeñado un papel crucial en el gran progreso que se ha conseguido últimamente en física de superficies. Igualmente espectaculares han sido los avances en microelectrónica. Se trata de un campo muy activo, en pleno desarrollo y con buenas perspectivas. Para esta década se puede prever un gran avance en el estudio de la quimisorción y el comienzo del estudio fundamental, sobre bases físicas, de los fenómenos catalíticos. Igualmente es de prever aún más progreso en la miniaturización y en microelectrónica de sólidos, lo que tendrá un fuerte impacto, vía la informática, sobre la vida de los seres humanos.



RELACION ENTRE EL FENOMENO CATALITICO Y LA QUIMISORCION. Sea la molécula *A* en fase gas (*a*). Aunque el estado final (*A* disociado en $B + C$) tenga una energía final E_{fg} más baja que la energía inicial E_{ig}, habría que elevar mucho la temperatura para ayudar a remontar la barrera de activación $E_g^* - E_{ig}$. La reacción puede seguir otro camino más fácil: la molécula *A* se adsorbe (A_a) formando enlaces con la superficie del catalizador (*b*). Estas interacciones afectan los enlaces internos de la molécula de modo que éstos están más "relajados" (en esencia, más débiles). La molécula puede entonces romperse con más facilidad, es decir, la barrera de activación por este camino es menor. Los productos de la reacción (B_a y C_a) se desorben, llegando así al mismo punto final ($B + C$ en fase gas). Sin este fenómeno catalítico la industria química no habría alcanzado el desarrollo que hoy muestra.

Muerte súbita del niño

Durante muchos años, este fenómeno, por el que un niño en apariencia sano muere inesperadamente, constituyó un misterio para los médicos. Nuevas pruebas apuntan, en la mayoría de los casos, hacia anomalías en el control respiratorio

Richard L. Naeye

Uno de los hechos más desesperantes que puede suceder a los padres es perder su hijo por el síndrome de muerte súbita infantil: el niño, cuya salud saltaba a la vista, es encontrado muerto en cama. El fenómeno, conocido también por sus iniciales SMSI (síndrome de muerte súbita infantil), se define clínicamente como la muerte súbita e inesperada de un niño, aparentemente sano, en el cual una autopsia rutinaria no permite identificar la causa del fallecimiento. Se la reconoce a veces por muerte en la cuna o en la cama, pues suele presentarse cuando el niño está durmiendo. En los Estados Unidos mata alrededor de 7000 niños por año, uno de cada 500 niños recién nacidos, aproximadamente. Ocupa el primer puesto entre las causas más frecuentes de muerte que ocurren entre un mes y un año de edad. Se halla generalizada también en muchos otros países. Por mucho tiempo ha constituido poco menos que un misterio para los médicos. Sin embargo, como resultado de un intenso esfuerzo interdisciplinario realizado durante los últimos ocho años, se han obtenido en nuestros días varios indicios prometedores sobre el síndrome, que permiten abrigar la esperanza de llegar a identificar a las víctimas potenciales y señalar las etapas a recorrer para su salvación.

Abundan las ideas sobre posibles causas de tales muertes. La mayoría han venido afirmando que la muerte se debe a un suceso catastrófico súbito, que incidía en un niño hasta entonces sano. Hasta 1972 la hipótesis más extendida atribuía el desenlace a un cierre repentino de las vías aéreas superiores, que se presentaba sin síntomas preliminares. Se citaban tres tipos de pruebas en apoyo de esta opinión. La inflamación y las ulceraciones encontradas en las cuerdas vocales de algunas víctimas se esgrimían como muestra de que las cuerdas se habían cerrado súbitamente, cortando el paso de aire a los pulmones. (En los últimos años tales signos se han hallado con igual frecuencia en pequeños fallecidos por causas conocidas que en víctimas del síndrome de muerte súbita.) Hacía tiempo que se habían observado petequias –pequeñas hemorragias– en la superficie de los pulmones y de otros órganos del tórax de más de la mitad de las víctimas del síndrome. (Con anterioridad a 1972 se presumía que las petequias resultaban de la fuerte presión negativa intratorácica desarrollada en el momento en el que el niño sufría una obstrucción de la vía aérea. Estudios recientes realizados por Warren G. Guntheroth, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington, han mostrado que una obstrucción de la vía aérea no produciría por sí misma petequias.) La tercera anomalía comúnmente reconocida antes de 1972 era la presencia de líquido en los espacios aéreos pulmonares. (Este hallazgo, de una significación incierta, no es específico de la muerte súbita del niño; es más, puede desarrollarse después de la muerte si media un prolongado intervalo entre muerte y autopsia.)

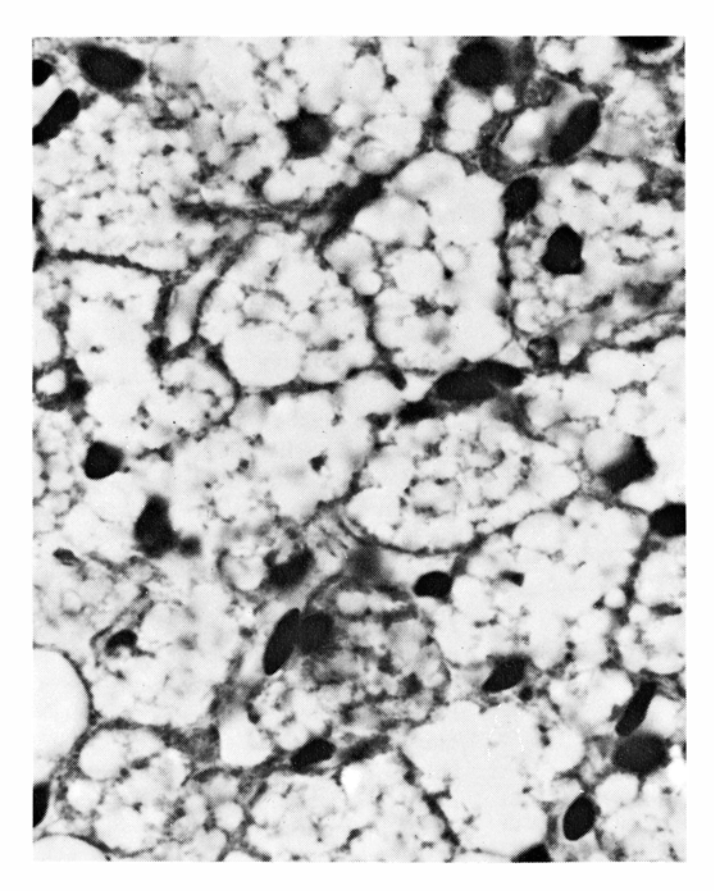
Transcurrieron muchos años sin que el síndrome de muerte súbita infantil despertara el interés de la clase médica. La investigación del síndrome ofrecía escaso atractivo para los estudiosos, ya que el diagnóstico podía hacerse solamente después de la muerte, situación esta que hacía inoperantes muchos de los medios de la investigación médica, centrada en sujetos vivos. Además, la mayoría de los investigadores no había visto nunca el síndrome o sus consecuencias, por cuanto los casos pasaban enseguida a la competencia policial, judicial y forense.

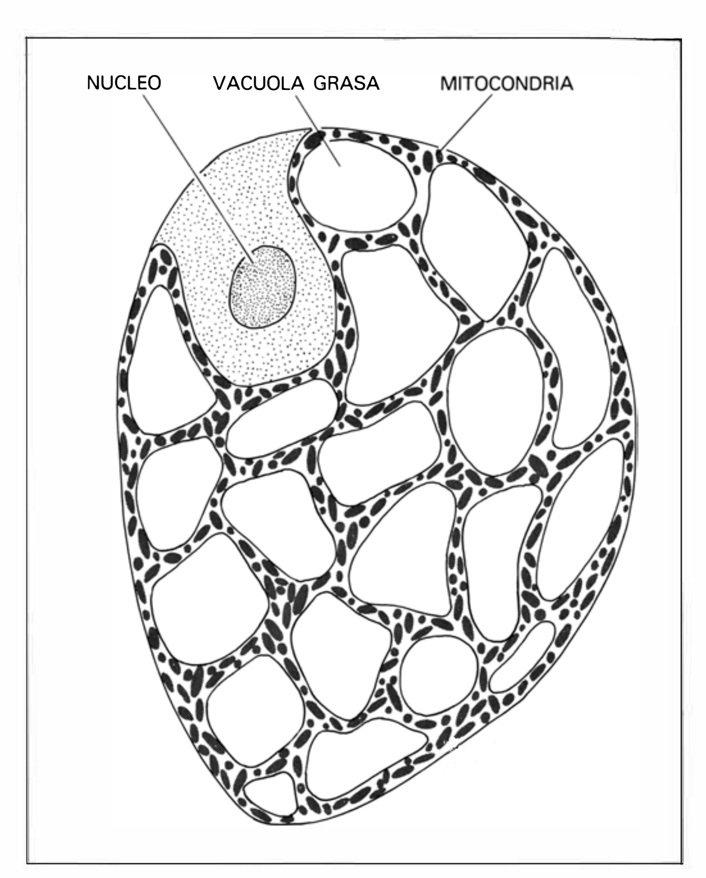
El período de abandono terminó cuando dos asociaciones nacionales de padres que habían perdido niños por el síndrome presionaron, a través del congreso, al Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos para que fomentase la investigación sobre el fenómeno. En 1972, Eileen G. Hasselmeyer, del Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano, organizó seminarios al objeto de reclutar colaboradores de diversas especialidades para investigar el síndrome. A raíz de ello, fisiólogos, pediatras, psicólogos, inmunólogos, bioquímicos y patólogos, que no habían mostrado ningún interés anterior por la muerte súbita infantil, se sintieron estimulados y se pusieron manos a la obra.

Las investigaciones epidemiológicas efectuadas antes de 1972 habían revelado algunas características poco comunes del síndrome, que no acababan de responder a una nueva obstrucción aguda de la vía aérea ni eran explicables a través de las hipótesis barajadas con anterioridad a ese año. Las muertes muestran una distribución peculiar de edades. No se registran en el período inmediatamente posterior al nacimiento. Surgen a las dos o tres semanas de edad, alcanzan su frecuencia máxima a los 3 meses de edad para ir decayendo hasta casi desaparecer transcurrido el primer año de vida. La mayoría de las hipótesis expuestas antes de 1972 no explicaban por qué las víctimas solían morir durante el sueño.

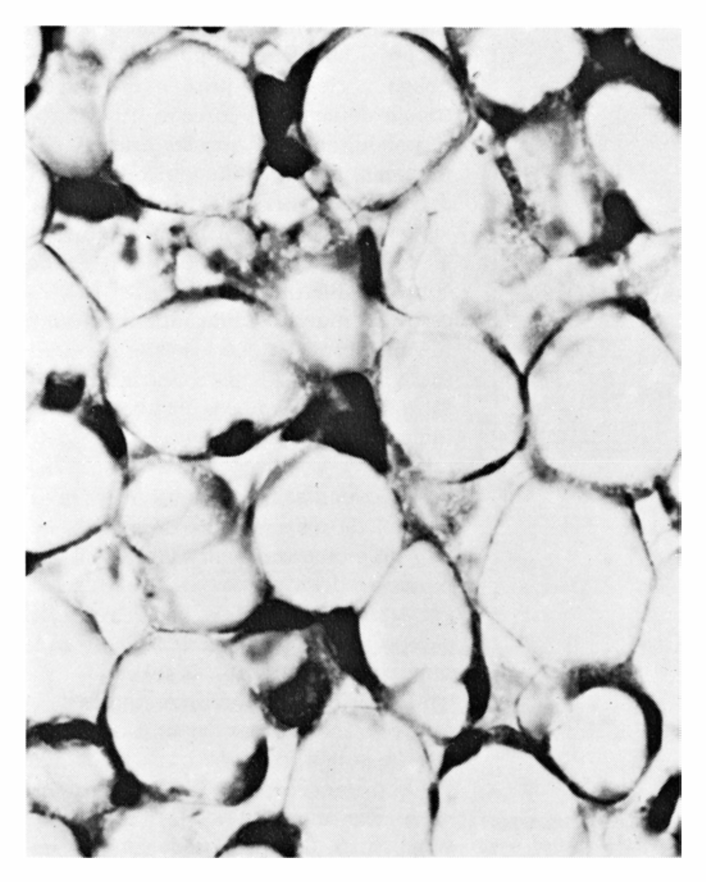
Varios de los colaboradores reclutados en 1972 plantearon la posibilidad de que las muertes obedecieran a una anomalía en el mecanismo de control de algún sistema de mantenimiento de la vida. La atención se dirigió pronto hacia la respiración, pues Alfred Steinschneider, a la sazón en el Centro Médico Septentrional de la Universidad del estado de Nueva York en Siracusa, informó de la existencia de períodos prolongados de apnea (interrupción de la respiración) durante el sueño en diversos niños que fueron víctimas del síndrome. Postuló que los pequeños habían muerto durante un episodio apneico. Pronto fue bautizada tal apreciación como hipótesis de la apnea.

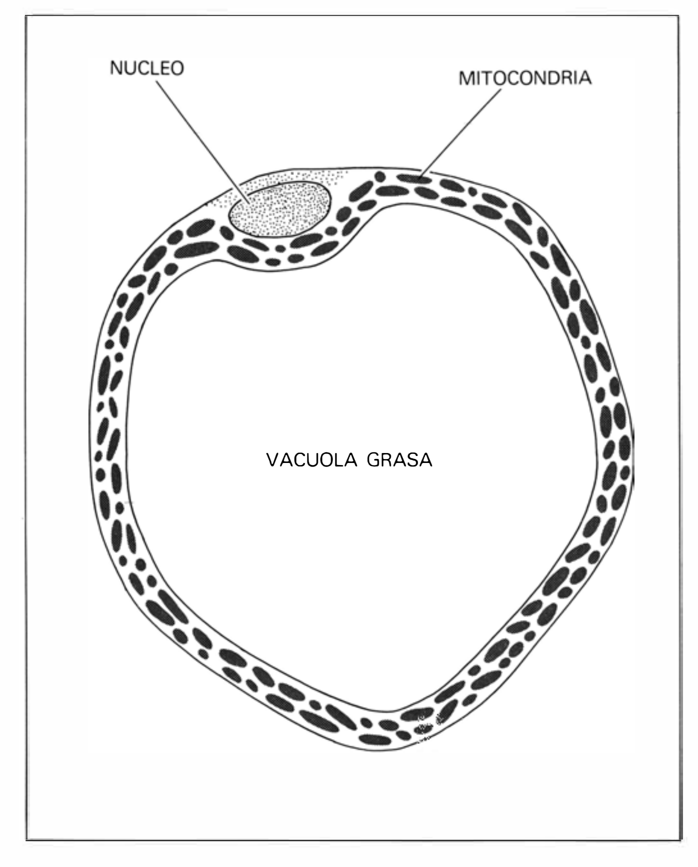
Elliot D. Weitzman, del Hospital y Centro Médico Montefiore de Nueva



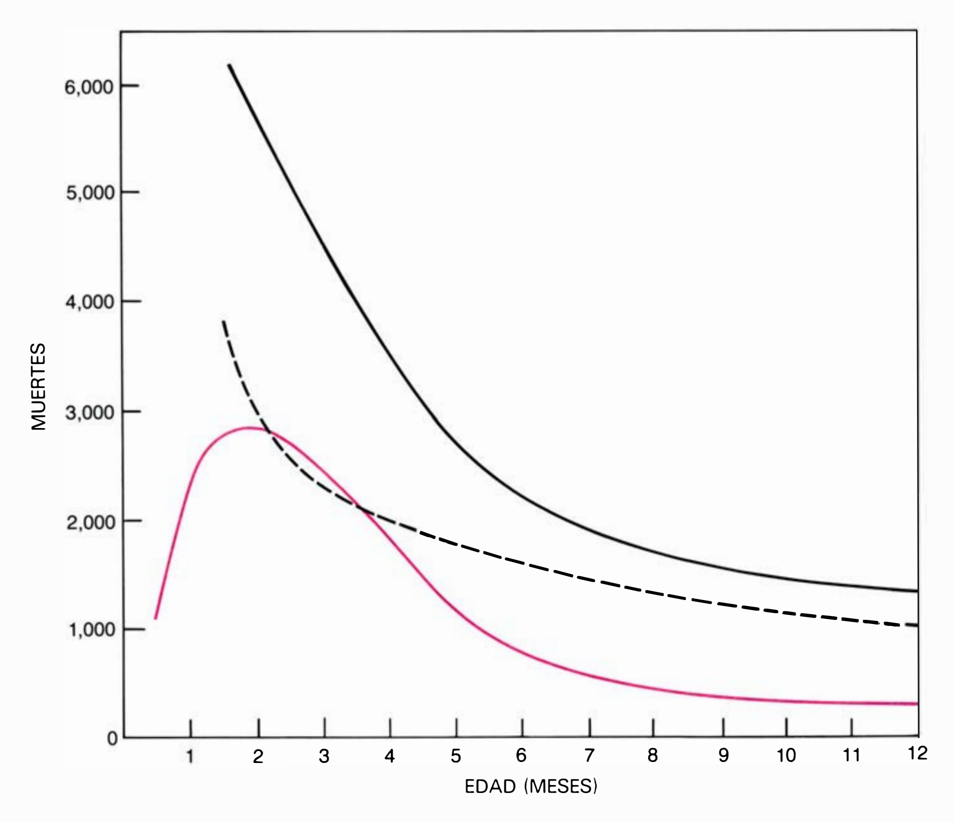


GRASA PARDA, retenida por un tiempo excepcionalmente largo en muchos niños que fallecen por el síndrome de muerte súbita. A la izquierda, una microfotografía (a 1500 aumentos) de las células de un niño que murió del síndrome a los 4 meses de edad. Las células redondas contienen tabiques de mitocondrias circundantes a pequeñas vacuolas de grasa (*derecha*). Las mitocondrias confieren a la grasa parda su aspecto característico.

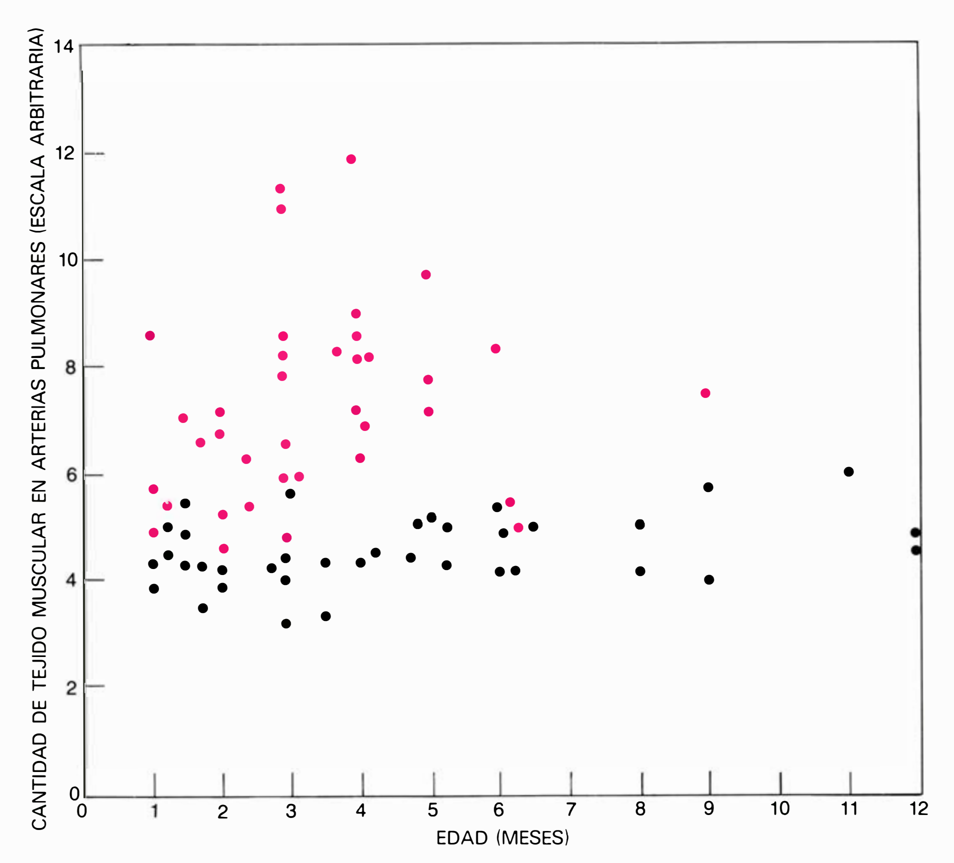




CELULAS GRASAS NORMALES en la microfotografía de la izquierda y cuyo esbozo esquemático aparece a la derecha. Las células de la microfotografía son de un niño muerto en accidente a los cuatro meses de edad. La mayoría de las mitocondrias han desaparecido. Su conservación en muchos de los niños muertos súbitamente parece deberse a la hipoxemia causada por una hipoventilación crónica de los pulmones durante el sueño del bebé.



MUERTES INFANTILES (en USA) causadas por el síndrome de muerte súbita del niño (*color*) y por todas las demás razones (*curva negra discontinua*). La curva negra continua muestra el número total de muertes entre las edades de 10 semanas a 12 meses. El síndrome constituye la causa de muerte más frecuente entre las edades de un mes a un año, y a esta edad sobrepasa a todos los demás agentes.



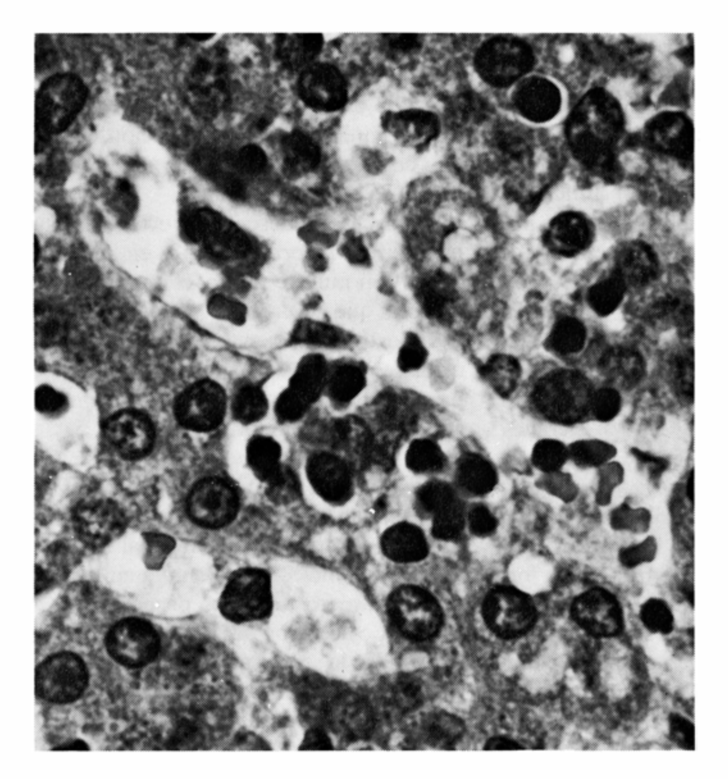
AUMENTO DE TEJIDO MUSCULAR en las arterias pulmonares. Se trata de un frecuente hallazgo postmortem en las víctimas del síndrome de la muerte súbita. La anomalía se refleja en este gráfico, que muestra la cantidad de tejido muscular de las arterias pulmonares en diversos niños muertos súbitamente (*en color*) y en controles (*en negro*), niños que murieron por otras causas. Al parecer, dicho aumento resulta de una hipoventilación crónica de los pulmones, lo que obliga a las arterias a una contracción crónica y a desarrollar tejido muscular adicional (*en ordenadas y a una escala arbitraria*).

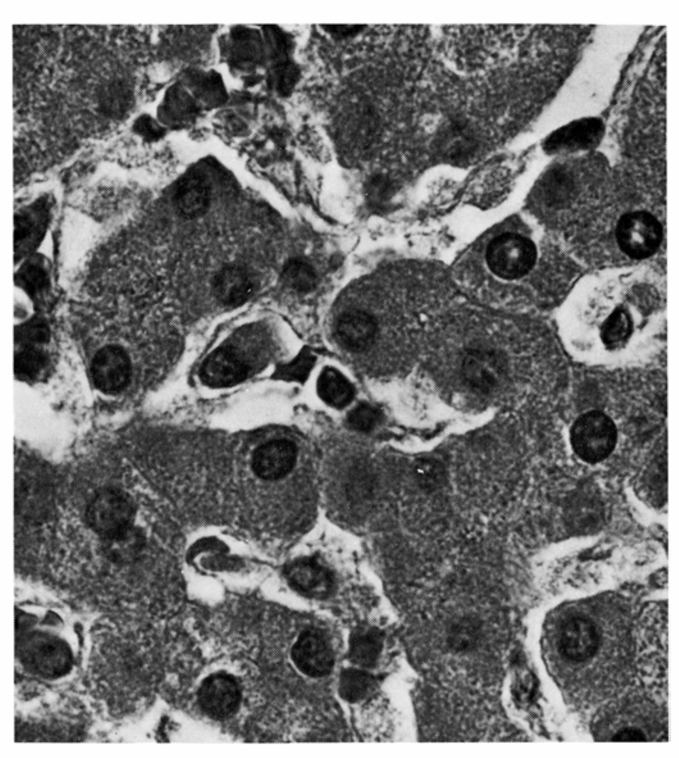
York, y otros señalaron que la apnea durante el sueño descrita por Steinschneider recordaba cierta condición de los adultos: aquella en que padecían anomalías crónicas en el control de la respiración. Tales adultos hipoventilan de forma característica sus pulmones durante el sueño. Era plausible que las víctimas de la muerte súbita infantil hicieran lo mismo.

Trabajando en el Centro Médico Milton S. Hershey de la Universidad del estado de Pennsylvania, sospeché que tal clase de hipoventilación habría de dejar huellas o señales anatómicas. Con la ayuda de Russell S. Fisher, jefe de investigación clínica de Maryland, abordamos un estudio a fin de descubrir si las víctimas de la muerte súbita infantil presentaban dichas huellas o señales. Observamos al poco que cerca del 60 por ciento de las víctimas evidenciaban un incremento anormal de tejido muscular en las pequeñas arterias pulmonares. Postulamos que el aumento se debía a una hipoventilación crónica de los pulmones. La hipoventilación disminuye el nivel de oxígeno en los espacios aéreos de los pulmones, provocando una constricción de las arterias próximas. Cuando una hipoventilación crónica prolonga la constricción, aumenta el número de células musculares en la pared de las arterias (condición conocida como hiperplasia). La hiperplasia aumenta la resistencia del sistema vascular al paso de sangre a través de los pulmones, lo que obliga a elevar la presión en el ventrículo derecho del corazón. El corazón responde, al igual que las arterias pulmonares, con un aumento de la cantidad de tejido muscular de la pared del ventrículo derecho. Ambas anomalías, la de las arterias pulmonares y la del corazón, fueron pasadas por alto en casos de muerte súbita infantil durante muchos años, ya que los estudios cuantitativos necesarios para descubrirlas no formaban parte de los exámenes postmortem rutinarios.

La hipoventilación que disminuye el nivel de oxígeno en los espacios aéreos pulmonares provoca también la disminución del nivel de oxígeno en la sangre arterial que circula por el resto del cuerpo. Esta deficiencia de oxígeno en la sangre se denomina hipoxemia. Sus consecuencias se descubren en más de la mitad de las víctimas del síndrome de la muerte súbita infantil.

La primera consecuencia en observarse fue una retención anormal de grasa parda. La grasa parda rodea al nacer a ciertos órganos internos vitales y está especialmente adaptada para la producción de calor. Lo que confiere a la





ANOMALIAS EN LA PRODUCCION DE ERITROCITOS en algunos de los niños que mueren súbita e inesperadamente. El área elíptica, a la izquierda del centro de la primera microfotografía, pone de relieve los precursores de eritrocitos en el hígado de una víctima del síndrome de muerte súbita de cuatro meses de edad. Normalmente, el hígado no produce eritrocitos a partir de la primera semana de vida. La microfotografía derecha muestra un corte del hígado de un niño de la misma edad que murió por otras causas. En el hígado no se detectan precusores de eritrocitos. La médula ósea incrementa también su producción de glóbulos rojos en muchos niños que fallecieron de muerte súbita. Las anomalías provienen, a buen seguro, de la deficiencia de oxígeno en la sangre, lo que hace liberar a los riñones eritropoyetina, que estimula la producción de eritrocitos.

grasa parda su apariencia característica al microscopio es la gran abundancia de mitocondrias apreciable en las células grasas. La mayoría de las mitocondrias suelen desaparecer durante el primer año de vida, a partir del cual las células pierden su color pardo y su característico aspecto microscópico.

En niños hipoxémicos crónicos, las células grasas conservan después del nacimiento sus mitocondrias y su color pardo. Condición presente aproximadamente en la mitad de las víctimas del síndrome de la muerte súbita infantil, ello nos sugiere que los bebés padecieron largos periodos de hipoxemia antes de expirar. La mayoria de las víctimas del síndrome evidencian también un aumento anormal del tejido glandular adrenal especializado en la formación de adrenalina (epinefrina). Un aumento en la liberación de epinefrina por parte de las glándulas suprarrenales puede explicar la retención de la grasa parda en los niños que mueren del síndrome, ya que la grasa parda usualmente reaparece en los adultos que, a consecuencia de un tumor adrenal, tienen un elevado nivel de epinefrina en la sangre.

Los signos adicionales de hipoxemia crónica en los niños con muerte súbita incluyen la producción de eritrocitos por el hígado y un aumento en la producción de los mismos en la médula ósea. (Normalmente el hígado no forma células rojas después de la primera semana de vida). Estos efectos surgen presumiblemente a consecuencia de la liberación de la hormona eritropoyetina por parte del riñón, provocada por la hipoxemia, con lo cual se estimula la producción de glóbulos rojos.

Las víctimas del síndrome de la muerte súbita no son extremadamente pequeños al nacer, aunque suelen sufrir un retardo en el crecimiento inmediato al nacimiento. El desarrollo de sus órganos se asemeja al que presentan los animales de experimentación mantenidos en un ambiente empobrecido en oxígeno después del nacimiento. No se parecen en absoluto a los patrones de desarrollo resultantes de la hiponutrición. Otro signo de hipoxemia apreciable en aproximadamente la mitad de los niños es el incremento en el nivel de la hormona adrenal cortisol; la concentración aumenta normalmente en respuesta a la hipoxemia y a otras formas de stress.

Ante tantos signos de hipoventilación que anteceden a la muerte de estos niños, uno se siente impulsado a buscar una razón. Existen signos orientadores de que la hipoventilación es el resultado de anomalías en los mecanismos que controlan la respiración. Episodios prolongados de apnea durante el sueño en los niños que más tarde caerán víctimas del síndrome de la muerte súbita no sólo han sido observados por Steinschneider, sino también por Daniel C. Shannon y Dorothy H. Kelly, del Hospital Pediátrico de Boston, quienes, a su vez, observaron hipoventilación crónica y respuestas respiratorias anómalas frente a un aumento del nivel de dióxido de carbono inhalado. Estos signos sugieren que los pequeños sufrían anomalías en los centros de control del tallo cerebral, que, en respuesta al aumento de dióxido de carbono, suelen incrementar la frecuencia y profundidad de la respiración.

Se acaban de desvelar las causas de por qué el síndrome de la muerte súbita aparece con más frecuencia en los primeros meses de vida. David Read en Sydney, Australia, y Charles Bryan y Elliott A. Phillipson, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Toronto, han demostrado que en ese período ciertos mecanismos de control respiratorio actúan de manera diferente de como lo hacen en etapas más avanzadas de la vida. En los niños de uno a seis meses, los pulmones se colapsan parcialmente en la fase de movimientos oculares rápidos del sueño (REM), debido a que, en dicha fase, los músculos intercostales que desplazan la caja torácica dejan de funcionar. Si el diafragma suspende también su movimiento, la respiración queda interrumpida durante la fase de movimientos oculares rápidos del sueño; una pequeña cantidad de aire residual

permanece en los pulmones para continuar el intercambio normal de oxígeno y anhídrido carbónico. La consecuencia es la aparición de hipoxemia al cabo de pocos segundos. Un adulto, por el contrario, puede dejar de respirar durante 30 a 40 segundos sin que se desarrolle una hipoxemia severa.

Cuando la respiración se retarda o detiene, los reflejos que aumentan su frecuencia o que la restauran en el niño mayor son notablemente menos activos en el bebé. La supervivencia de estos niños depende entonces de un reflejo que los sustrae de la fase REM del sueño, y de la conexión de los mecanismos del tronco encefálico (o tallo cerebral) que reinstauran la respiración. El seno carotídeo, un pequeño órgano del cuello, interviene de un modo destacado en estas funciones. Nuestro grupo descubrió en 1976 que más de la mitad de las víctimas del síndrome de la muerte súbita manifestaban un hipodesarrollo del seno carotídeo. Si estos órganos no funcionan con normalidad, el niño puede no ser capaz de reinstaurar su respiración durante un episodio prolongado de apnea. Los niños fallecidos súbitamente que presentan un hipodesarrollo de los senos carotídeos muestran también en el examen postmortem los signos de la hipoventilación e hipoxemia que he descrito.

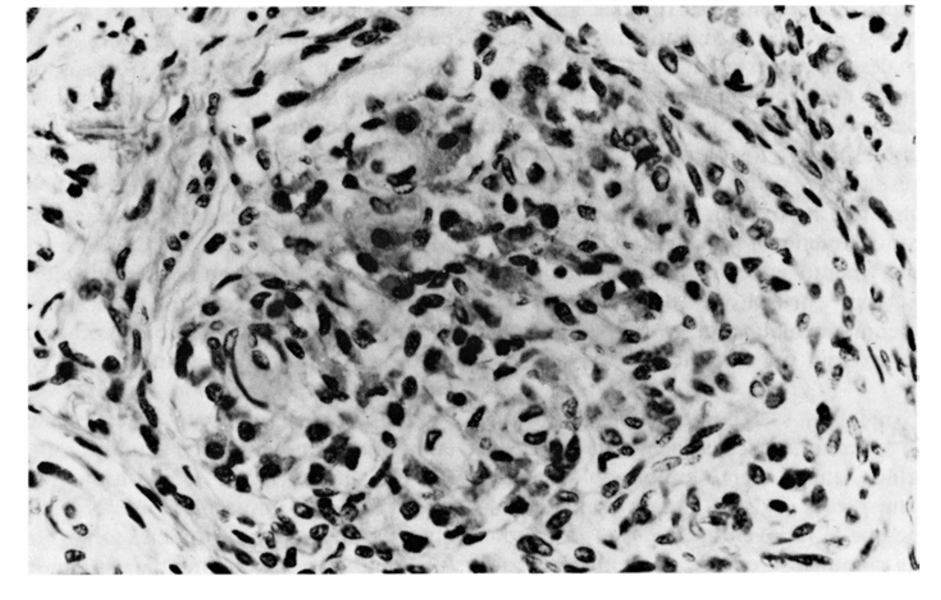
¿Por qué está hipodesarrollado el seno carotídeo en tantas víctimas de este síndrome? Una causa de ello puede radicar en la falta de estimulación por impulsos nerviosos que llegan a la carótida desde los centros de control de la respiración en el tallo cerebral. Podríamos cuestionarnos entonces si tales centros son estructuralmente normales. No se han podido efectuar estudios anatómicos detallados de los mismos, por ser ambos centros de estructura compleja y hallarse estrechamente asociados con otros centros que controlan funciones vitales distintas. Las anomalías que pudieran encontrarse en los centros de control respiratorio deberían ser, con toda probabilidad, mínimas, ya que un niño con anomalías profundas no llegaría a sobrevivir al parto.

Nuestro grupo del Centro Hershey descubrió en 1976 que cerca de la mitad de los niños muertos súbitamente mostraban una proliferación anormal de fibras astrogliales en la formación reticular lateral del tallo cerebral. Esta formación constituye un centro clave del control respiratorio; y sería tentador interpretar la proliferación glial como prueba de la lesión de los mecanismos de control respiratorio. Pero tal explicación resultaría inadecuada, habida cuenta de que otras áreas del tallo cerebral exhiben también esa condición en las víctimas del síndrome. Además, la proliferación anormal puede venir inducida por la hipoxemia crónica. Sachio Takashima y sus colaboradores, del Hospital para Niños Enfermos en Toronto, han encontrado recientemente que, en los niños con muerte súbita, la proliferación astroglial está aumentada en las áreas del cerebro donde el aporte sanguíneo es menor. El hallazgo apoya la hipótesis de que la proliferación astroglial obedece a una lesión hipoxémica.

John Emery y sus colaboradores, de Sheffield (Inglaterra), han observado que la mitad aproximada de las víctimas del síndrome de muerte súbita que ellos han investigado tienen fagocitos cargados de grasa en el líquido espinal. La grasa parece originarse en la degradación del tejido cerebral. La hipoxemia puede ser la causa de esta degradación.

John Olsson descubrió recientemente en nuestro laboratorio que, en muchos niños con muerte súbita, el área del tallo cerebral que controla la lengua tiene una significativa deficiencia en neuronas, o células nerviosas. En los adultos existe un síndrome, caracterizado por apnea, en el que la lengua se desplazá hacia atrás y obstruye la entrada de las vías aéreas durante el sueño. Queda por ver si la lengua participa en la obstrucción de las vías aéreas que aparece al final de episodios apneicos ocasionales en un pequeño número de niños propensos a la apnea. Los centros del tallo cerebral que controlan la respiración se hallan en estrecha relación con estructuras que controlan otras funciones; así, algunos defectos que afectan a los mecanismos del control respiratorio pueden también afectar a otras funciones. En algunos de los niños que fallecieron por síndrome de muerte súbita se descubrieron alteraciones no respiratorias. Entre éstas había anomalías en la regulación de la temperatura, alimentación, tono muscular y reflejos neurológicos, que comenzaron poco después del nacimiento. Algunos padres de niños muertos súbitamente comunicaron que sus hijos tenían un llanto anormal desde el parto. El registro de algunos de esos lloros confirmó su carácter anormal. Aparte de los trabajos de Olsson, pocos esfuerzos se han hecho para correlacionar los distintos hallazgos no respiratorios en niños muertos súbitamente con lesiones específicas del cerebro.

De las entrevistas que mantuvimos con padres se desprendía que la mayoría de los niños con muerte súbita mostraron reacciones a diversos estímulos ambientales menos intensas que sus hermanos a la misma edad. Este comportamiento característico se hizo más evidente en las víctimas de muerte súbita que presentaban un aumento anormal de tejido muscular en las arterias pulmonares y los restantes signos postmortem de hipoventilación pulmonar crónica e hipoxemia. Las observaciones subrayaron la posibilidad de que los patrones de comportamiento fueran el resultado de sutiles daños cerebrales causados por la hipoxemia. Pruebas de lesiones de esa índole surgieron de un trabajo preliminar en nuestro laboratorio que mostraba un retardo en la mielinización de dos áreas del tronco encefálico en víctimas de la muerte súbita. La mielina es el aislante graso que permite la propagación



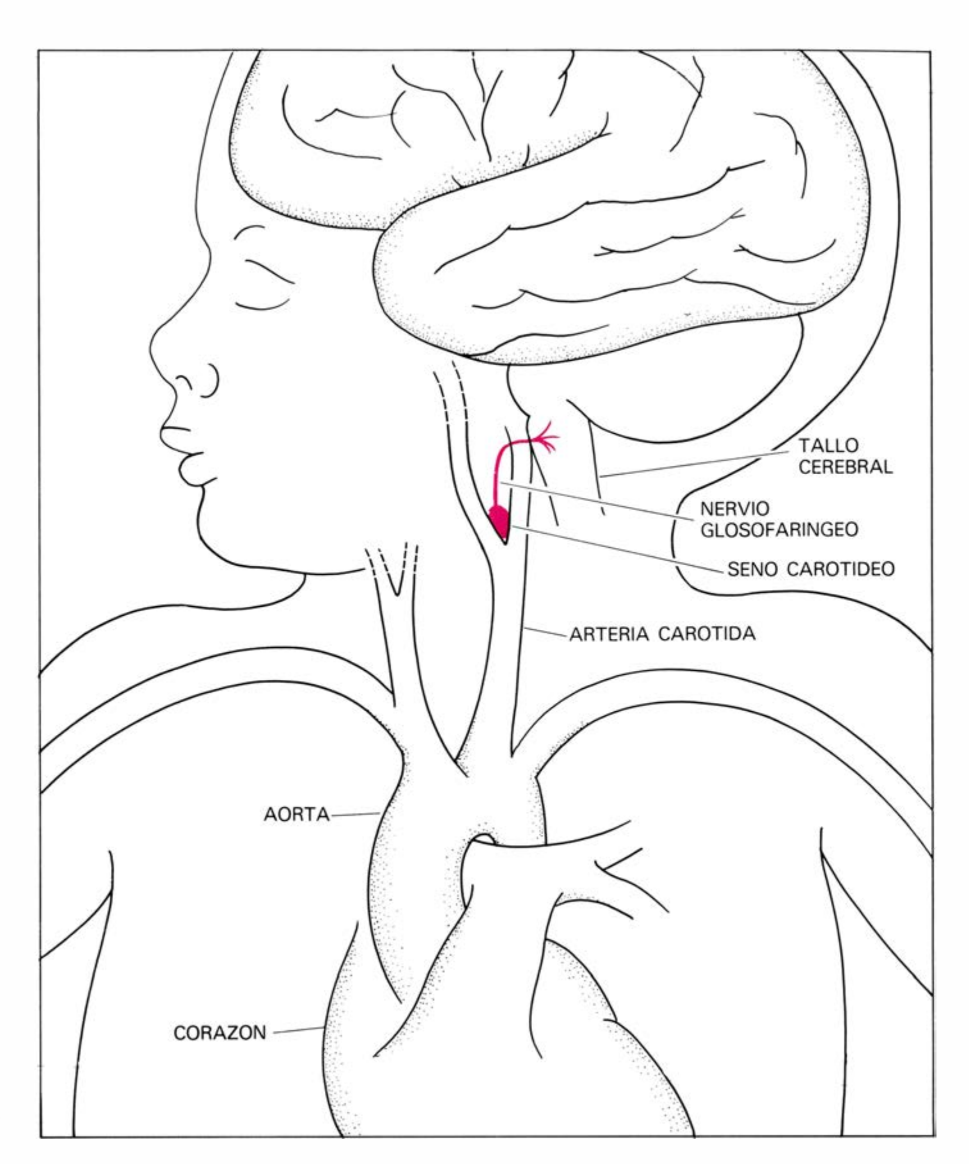
SENO CAROTIDEO HIPOTROFICO, otro hallazgo habitual en niños muertos súbitamente. Dicho seno, de estructura toscamente circular, ocupa la mayor parte de esta microfotografía y aparece magnificado en 420 aumentos. Un seno carotídeo normal representado a la misma escala sería mucho mayor. Los senos carotídeos, uno a cada lado del cuello, están implicados en el control respiratorio.

de los impulsos eléctricos a lo largo de las fibras nerviosas. Cualquier retardo en la mielinización provoca un retraso en la maduración de determinadas funciones cerebrales.

Diversos investigadores han sugerido que ese tipo de comportamiento puede deberse a una deficiencia en los niveles de los neurotransmisores que permiten la conducción de los impulsos de una neurona a otra. John D. Connor, farmacólogo de nuestra institución, ha medido el nivel de los neurotransmisores norepinefrina, serotonina y dopamina en varias áreas del cerebro de niños muertos súbitamente. No encontró diferencias al comparar dichos niveles con las concentraciones normales en niños que habían fallecido en accidentes.

Si las anomalías primarias responsables de la muerte súbita en el niño se localizan con frecuencia en el tallo cerebral y en el seno carotídeo, ¿cuándo se lesionaron esos órganos? Algunas disfunciones observadas en los niños que murieron del síndrome se reconocieron ya en el período subsiguiente al parto. La lesión o el defecto primarios podrían ser congénitos, aunque también podrían resultar de una lesión sufrida durante el embarazo, en los períodos de dilatación y expulsión en el parto. Los datos que hemos recogido en una amplia revisión no aportan pruebas de que los niños con muerte súbita padecieran mayor deprivación de oxígeno, daño por agentes anestésicos o traumas, antes o durante el parto, que aquellos que no murieron. Las observaciones señalan la posibilidad de que algunas de las anomalías del cerebro en las víctimas del síndrome sean de origen genético o que la lesión primaria ocurra durante el período fetal. Sin embargo, el síndrome de la muerte súbita en el niño raras veces presenta carácter familiar, y las investigaciones publicadas no han logrado identificar anomalías en el control de la ventilación en las familias de las víctimas.

Podemos aducir nuevas pruebas de que el síndrome se trata de un trastorno adquirido, no genético. Donald R. Peterson, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington, ha descubierto que la tasa de incidencia de muerte súbita infantil entre primos hermanos no es más alta que la de la población global. Ha indicado también que si un gemelo muere del síndrome, el riesgo de que el otro muera también del mismo es solamente del 5 al 8 por ciento, con independencia de que los gemelos sean o no univitelinos. La baja tasa de concordancia sugiere que es bastante improbable un origen genético en la mayoría de los casos del síndrome.



LOCALIZACION ANATOMICA DE LOS SENOS CAROTIDEOS, representada esquemáticamente. La anomalía carotídea encontrada frecuentemente en los niños muertos súbitamente ha determinado que la investigación se dirigiera a comprobar si los centros de control respiratorio del encéfalo resultan ser estructuralmente anormales. Pero la labor se ve frenada por el hecho de que tales centros de control respiratorio se hallan en estrecha asociación con otros que tienen por misión funciones distintas.

A pesar de que la tasa de concordancia entre gemelos resulta demasiado baja para apoyar una hipótesis genética es mucho más alta que la incidencia del síndrome en la población general. En esta línea cabría pensar en que, si ambos gemelos mueren, es que padecieron un mismo ambiente predisponente. Estudiando los datos de nuestra revisión hemos hallado recientemente seis factores que parecen tener una relación independiente con la muerte súbita infantil; uno de ellos es de carácter genético y cuatro están relacionados con el embarazo. El factor genético es la sangre infantil del grupo *B*. Los factores relacionados con el embarazo son: (1) una infección bacteriana del líquido amniótico, (2) anemia de la madre y (3) consumo de cigarrillos o (4) barbitúricos por la madre. El hacinamiento doméstico constituye el factor restante.

De los seis factores, cuatro pueden producir otras lesiones al feto o colocarlo en un riesgo elevado de daño. Las infecciones del líquido amniótico causan directa o indirectamente lesiones cerebrales en algunos niños. El fumar por parte de la madre reduce el flujo sanguíneo de la placenta y retarda el crecimiento del feto. Se ha demostrado que los barbitúricos provocan un retardo selectivo del crecimiento en ratas recién nacidas. La anemia severa de la madre gestante está asociada a un aumento de muertes fetales y de niños recién nacidos. La sangre del grupo *B* en el niño es un factor de alto riesgo para nacimiento de fetos muertos y para muertes poco después del parto, causadas por un número de trastornos no relacionados con la muerte súbita del niño. Peterson ha encontrado que el síndrome tiene una frecuencia particularmente alta en la descendencia de madres que han tenido más de un embarazo. El factor ambien-

tal específico responsable está aún por determinar.

Muchos otros factores asociados al síndrome parecen perder su alto riesgo en ausencia de una infección del líquido amniótico; entre ellos: parto prematuro, que el niño sea varón o no blanco, bajos recursos familiares y situaciones en las que la madre está poco educada, no frecuenta los servicios de asistencia prenatal o tiene una historia de abortos.

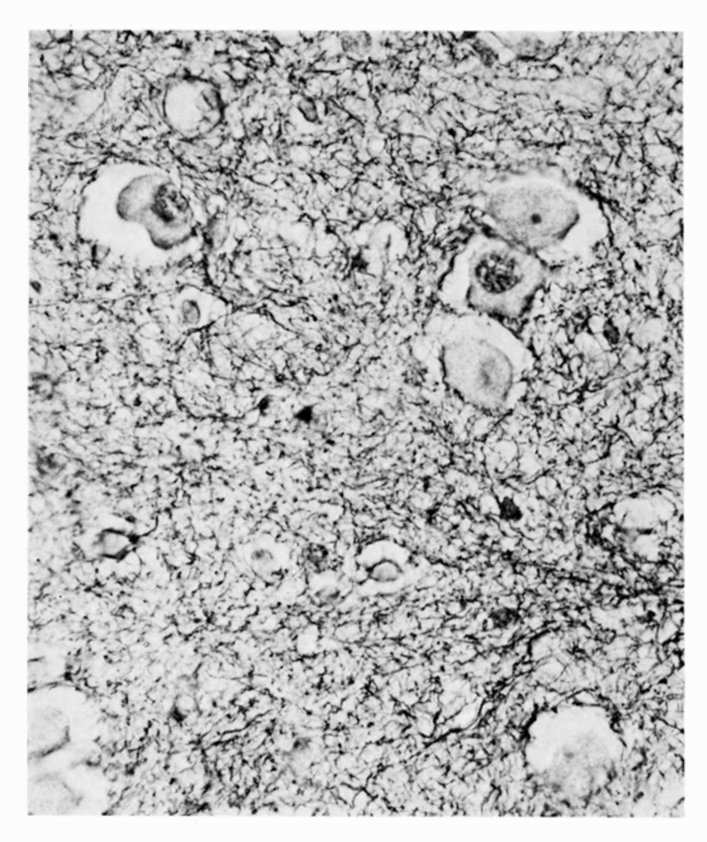
En nuestro estudio, las muertes súbitas relacionadas con el hacinamiento doméstico ocurrieron en niños en los que la autopsia demostró una ligera infección del tracto respiratorio. Otras investigaciones han puesto de manifiesto que las infecciones del tracto respiratorio aumentan la frecuencia y duración de las pausas apneicas en los niños propensos a la apnea.

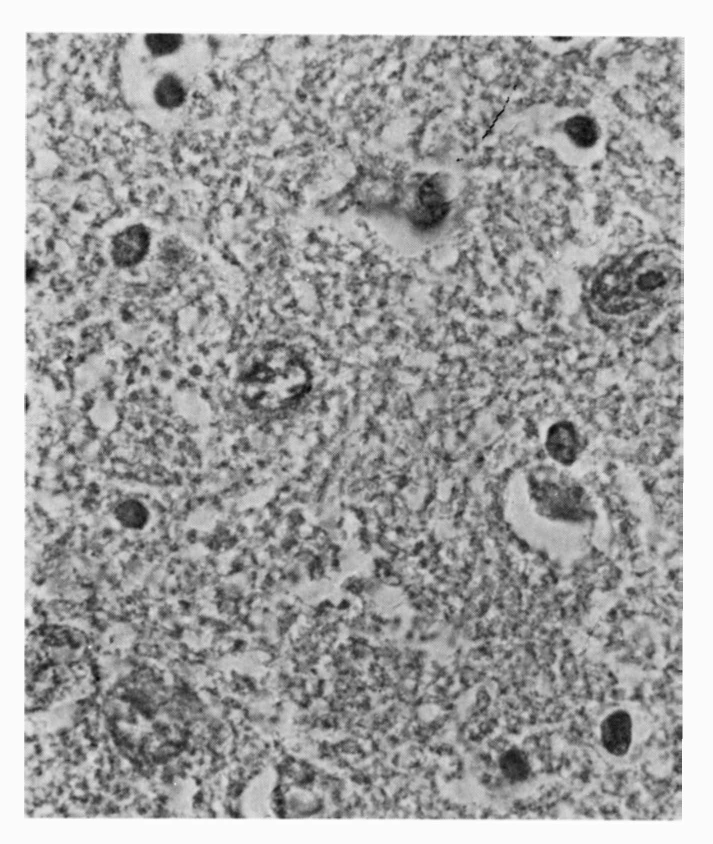
Aun cuando consideremos que los seis factores identificados contribuyan a la génesis de la muerte súbita del niño, sólo puede explicarse así un tercio aproximado de los fallecimientos. La conclusión más importante que hemos de deducir de ello es que la vida fetal constituye una fase prometedora, centrada en la cual debe proseguir la búsqueda de los orígenes del síndrome. Advirtamos además que el tallo cerebral es particularmente vulnerable durante la vida fetal, pues tiene unas necesidades metabólicas mayores que otras áreas del cerebro. El tallo cerebral es susceptible a lesiones causadas por bajos niveles de oxígeno y de glucosa en sangre.

Aunque la hipótesis de la apnea de Steinschneider disfrute de un abundante apoyo experimental, no explicará fácilmente todas las muertes súbitas infantiles. Un tercio, como mínimo, de las víctimas no tenía ninguno de los signos postmortem que sugieren una hipoventilación de los pulmones o una hipoxemia crónica antes de la muerte. Se han avanzado cientos de hipótesis para explicar estas muertes restantes, frecuentemente sin apoyo experimental o sólo con pruebas incompletas y sin corroborar. A pesar de la confusión reinante, se han encontrado indicios de mecanismos no respiratorios en niños muertos de repente. Durante episodios de apnea en niños dormidos se ha observado la aparición de bradicardia (bajo rendimiento cardíaco) y serios trastornos del ritmo cardíaco. Los hallazgos han llevado a especular sobre la posibilidad de que las arritmias cardíacas repentinas, con o sin apnea, causaran la muerte en algunos casos. La hipótesis es plausible, pero los investigadores que trabajan en esa dirección se han encontrado en un difícil callejón: imposibilidad de estudiar a las víctimas antes de la muerte. Las indagaciones de anomalías cardiacas entre los familiares de los niños muertos súbitamente no han aportado hasta el momento ninguna conclusión.

De un 5 a un 10 por ciento de las muertes atribuidas al síndrome, y no corraboradas por la autopsia, se deben en realidad a otras causas identificables, como meningitis, infecciones fulminantes, homicidio y estrangulamiento accidental en cunas mal diseñadas. Los fabricantes han cambiado sus diseños de cunas, por lo que los accidentes fatales motivados por estrangulamiento accidental tendrían que desaparecer con el tiempo. Distintos estudios han demostrado que hasta los niños recién nacidos apartan las sábanas colocadas sueltas sobre su cara, lo que confirma la opinión de que la sofocación por la ropa de cuna no es una causa verosímil de muerte súbita infantil, aunque los angustiados padres sostengan que así debió ocurrir.

Según parece, la muerte súbita del niño se hace más frecuente cuando la madre ha tomado metadona en el curso de un tratamiento por adicción a la heroína. El desenlace bien pudiera obedecer a otros factores de riesgo para la vida del niño (infección del líquido amniótico, por ejemplo), aunque cabe la posibilidad de que la propia metadona incida de algún modo. Después de una sola dosis de metadona la madre hipo-





PROLIFERACION de fibras de la astroglía. Se trata de un fenómeno observado en la mitad de las víctimas del síndrome de muerte súbita. Las fibras aparecen en muchas áreas del tallo cerebral, incluyendo la formación reticular lateral, un centro de control de la respiración. Ello supone una prueba adicional de la existencia de hipoxemia prolongada en muchos niños muertos súbitamente. La microfotografía de la izquierda muestra una sección del tallo cerebral de uno de dichos niños. La madeja de líneas negras son fibras astrogliales. No aparecen en el tallo cerebral normal (*derecha*).

ventila sus pulmones durante 24 horas, y los niños nacidos de estas madres tienen una respuesta inferior a los estímulos que normalmente incrementan la ventilación.

En algunos animales de experimentación jóvenes, la estimulación de la laringe y de las zonas circundantes por parte de diferentes líquidos lleva a una interrupción del latido cardíaco y de la respiración. En consecuencia, podría pensarse en regurgitaciones de líquido del estómago o aspiraciones de líquido en la laringe como responsable de algunas muertes súbitas infantiles. De momento resulta inviable el estudio de este mecanismo en seres humanos sin peligro o riesgo, por lo que, durante algún tiempo, no sabremos cuál sea su incidencia en el síndrome.

Sthephen Arnon y sus colegas, del Departamento de Salud de California, han identificado un pequeño número de víctimas del síndrome que fallecieron a causa de una forma infecciosa de botulismo. La bacteria (*Clostridium botulinum*) puede crecer en el intestino infantil y fabricar suficiente toxina para causar la muerte súbita. El origen de la infección ha sido localizado habitualmente en la ingestión de esporas bacterianas contenidas en la miel. La toxina actúa bloqueando de forma irreversible las terminaciones nerviosas e impidiendo la liberación del neurotransmisor acetilcolina. Con el tiempo, los músculos implicados en la respiración quedan paralizados.

El impacto causado por la muerte súbita de un niño sobre las familias afectadas y sobre la sociedad es más grave que el que cabría suponer por el número de casos. Los padres suelen reaccionar con shocks, incredulidad e ira. Hasta hace poco, la mayoría de las muertes súbitas infantiles quedaban por desvelar, y así, los padres se lanzaban mutuos reproches o culpaban a la persona que se hallaba cuidando del niño en el momento de la muerte. En ocasiones, el dolor de los padres, teñido de culpa, persistía a lo largo de muchos años. Estos se tornan con frecuencia excesivamente angustiados y preocupados por los niños supervivientes o nacidos después y los someten a una sobreprotección. La policía, los vecinos y parientes albergan a veces sospechas de mal trato o negligencia paterna en los casos de muerte súbita, lo que puede hacer más suspicaces las relaciones con las autoridades que investigan el caso, así como dificultar las relaciones con parientes y amigos. Muchas de estas consecuencias desagradables podrían desaparecer cuando llegue a determinar las causas de cada muerte súbita infantil. A largo plazo las perspectivas para prevenir la muerte súbita de los bebés son prometedoras. Una vez que las lesiones prenatales que predisponen al niño a la muerte súbita hayan sido identificadas, será posible prevenir la lesión y con ello la muerte. Se están llevando a cabo investigaciones exhaustivas al objeto de determinar si pueden detectarse anomalías en niños recién nacidos que lleven a identificar a los que posean un alto riesgo de muerte súbita.

Entre los métodos más prometedores se cuenta el registro de la actividad eléctrica de las neuronas del tallo cerebral, en respuesta a estímulos visuales, auditivos y táctiles, a fin de evaluar la integridad del mismo. James Orlowsky y sus colegas, de la Clínica Cleveland, acaban de informar que tales registros (que mostraban respuestas a estímulos auditivos) eran anormales en 10 niños afectos de episodios de apnea amenazadores, y normales en niños que padecían hipoxemia prolongada producida por otras causas. Si estos y otros esfuerzos tienen éxito en la identificación de niños sujetos a un riesgo elevado de muerte súbita, se podrían evitar algunas de estas muertes, empleando monitores que advirtieran paros respiratorios o cardíacos. Aunque los monitores de este tipo disponibles hoy para uso doméstico son inadecuados, cabe esperar un perfeccionamiento de los mismos.

Diversos fármacos que estimulan los centros de control respiratorio podrían servir para prevenir los episodios de apnea en niños susceptibles. Por desgracia resultan demasiado tóxicos para su administración en casa, pero siempre existe la esperanza de que los laboratorios desarrollen compuestos inocuos y más selectivos. Cualesquiera que sean los recursos de que se eche mano, el niño los necesitará sólo durante unos pocos meses, pues los períodos prolongados de apnea que parecen identificar a muchos niños de riesgo elevado desaparecen entre los ocho y doce meses.

Si se hallan, por fin, las medidas necesarias para prevenir la muerte súbita infantil, ¿mostrarán acaso los supervivientes huellas de lesiones, daños cerebrales, por ejemplo? No es de esperar una secuela tal, si se evita que los procesos que predisponen a un recién nacido a la muerte súbita lleguen a manifestarse. Si se reanima a un bebé tras una apnea prolongada o un paro cardíaco, la perspectiva a largo plazo es, sin embargo, incierta. Tan sólo unos cuantos recién nacidos que han sobrevivido a un episodio como el citado sufren deficiencias a diferentes niveles, pero la mayoría de los supervivientes no muestran secuelas.

Ciencia y sociedad

La física, a debate

Desde la sustitución de la física clásica, newtoniana, por la interpretación cuántica, a principios de siglo, la realidad objetiva se ha convertido en centro de discusión. El sentido griego de la *physis*, de la naturaleza, mantenido y extendido por el propio Newton, se ha ido abandonando desde Plank cual si de algo utópico se tratara. Se perdió la seguridad que confiaban las mediciones. El propio lenguaje se hizo estrecho y se imponía, y en ello están los físicos, una nueva labor de creación y de dar nuevos contenidos a viejas expresiones. Términos perfectamente definidos antes en la física clásica como posición, velocidad, temperatura, energía, etcétera, no acaban de satisfacer a la concepción mecanicocuántica.

Decía poco antes de su muerte Heisenberg que no sabía qué había que entender por realidad fundamental. Y se mostraba escéptico a propósito de la carrera obsesiva por descubrir más y más partículas cuya fundamentalidad última nadie podía probar. Escepticismo que comparte el propio Dirac, para quien lo importante no es tanto amasar cantidad informativa cuanto poder sacar la teoría pertinente. Y aduce el testimonio de Einstein, quien no recorrió a nuevos diseños experimentales para idear la relatividad.

Un problema latente que remonta su origen a las primeras formulaciones de la denominada Interpretación de Copenhague es el de la subjetividad de la nueva física. A la hora de explicarla, se ha hablado incluso de secuelas platónicas y kantianas –estas últimas a través de las llamadas formas a priori– en la obra de Heisenberg y neopositivistas en Bohr. La objetividad y la subjetividad –la vieja *physis* de los jónicos y la naturaleza más el observador de los modernos– vuelven a entrar en conflicto en dos de sus máximos exponentes: Víctor F. Weisskopf, del MIT, y Bernard d'Espagnat, de la Universidad de París. Weisskopf critica el artículo que publicamos en *Investigación y Ciencia*, en enero de este año, con el título "Mecánica cuántica y realidad", del que es autor D'Espagnat. Quien, a su vez, replica. ¿Dos visiones distintas del hacer físico o búsqueda de una definición de la propia física?

1)*Exposición de Weisskopf*– El artículo de Bernard d'Espagnat podría dejar en algunos lectores una impresión distorsionada de la esencia de la mecánica cuántica. En particular considero erróneos el preámbulo y la frase orientativa del índice; el primero afirma que el mundo se compone de objetos cuya existencia depende de la consciencia humana, y el segundo mantiene que la mecánica cuántica está en desacuerdo con la doctrina de que el mundo es independiente de la mente. ¿Cómo puede ello ser así? La mecánica cuántica trata de las propiedades de un fragmento de metal, de los procesos que ocurren en el interior de lejanas estrellas o de la naturaleza de piedras que existían antes de la evolución de la humanidad. El artículo en sí ni siquiera apoya aquellas discutibles afirmaciones. No obstante, sí contribuye a mantener estos equívocos.

El artículo se basa en una definición de la realidad más bien estrecha, en concreto la aplicabilidad de conceptos que utilizamos al tratar con objetos macroscópicos, como la posición, velocidad y momento angular. La mecánica cuántica, sin embargo, ha demostrado que las definiciones clásicas son insuficientes para la descripción de fenómenos atómicos. Estamos tratando estados cuánticos: estados que tienen una forma particular de escapar a la observación ordinaria ya que estas observaciones, en muchos casos, destruyen las condiciones de existencia del estado. Los estados cuánticos se describen por medio de funciones de onda que implican la coexistencia de ondas y partículas en la naturaleza de los electrones y otras entidades físicas, situación que resultaría imposible en el marco de los postulados clásicos. Existen reglas bien definidas sobre cómo a partir de tales funciones de onda se determinan las propiedades de los sistemas atómicos.

Los postulados de la mecánica cuántica no contienen razones por las que ésta deba renunciar al concepto de una realidad independiente de la mente. Al contrario, sin la existencia de estados cuánticos no podríamos explicar las propiedades específicas de los elementos, la estructura de las moléculas y la existencia de vida. Es desde luego cierto que la realidad del estado cuántico es distinta de la realidad que adscribiríamos a un sistema de partículas ordinarias.

Las relaciones de incertidumbre de Heisenberg son señales que nos indican hasta dónde podemos aplicar conceptos clásicos a una situación cuántica. Para el caso del spin de un protón, estas relaciones dicen que no tiene sentido hablar de valor de la componente y del spin cuando la componente x está bien definida. Esta advertencia no es tenida en cuenta en la interpretación "realista" que hace d'Espagnat del experimento de Einstein-Podolsky-Rosen. Quienquiera que ignore las advertencias de Heisenberg acaba sumido en un mar de contradicciones.

D'Espagnat tiene razón cuando mantiene que una de las tres premisas que cita debe ser violada en la mecánica cuántica. La primera premisa afirma que cualquier regularidad observada debiera estar "causada por alguna realidad física". Esta premisa se satisface. Considero el estado cuántico una realidad física aun cuando no pueda ser descrita con conceptos clásicos. La segunda premisa de d'Espagnat sobre la inferencia inductiva ciertamente se cumple, pero debe tenerse cuidado al extraer lo que él denomina "conclusiones legítimas" a partir de las observaciones. Las conclusiones deben ser legítimas en el marco de la mecánica cuántica. Por ejemplo, no es legítimo suponer la existencia de valores definidos para dos componentes del momento angular.

La tercera premisa, la de la "separabilidad" o "localidad", desde luego no se satisface. Postula que no debería haber conexión entre mediciones sobre dos protones separados a excepción de aquellas mediciones tomadas antes de la separación de los protones. Estas conexiones inesperadas de hecho ocurren, pues el estado cuántico se extiende de un protón a otro incluso después de su separación. Estos estados cuánticos extendidos no son algo excepcional. En el famoso experimento de un haz de electrones que atraviesa dos rendijas de un diafragma y forma modelos de interferencia en una pantalla, el estado cuántico se extiende sobre una región que incluye las dos rendijas. En principio esta distancia podría ser tan grande como se deseara.

La extensión espacial de la función de onda de los dos protones A y B en el ejemplo de d'Espagnat hay que entenderla del siguiente modo. La función de onda mantiene correlaciones entre los spin de A y B: cuando el de A va hacia arriba, el de B va hacia abajo, y viceversa. Esto es cierto para cualquier distancia entre A y B. Un estado en el que existen estas correlaciones se denomina estado singlete. Posee la notable propiedad de que es un solo y siempre el mismo estado cuántico, independientemente de hacia dónde esté orientado el "arriba" y el "abajo". Este sorprendente resultado es una faceta del hecho de que, en un momento dado, las componentes del spin sólo tienen significación en una dirección. Siempre que se toma

una medición en *A*, el spin de *B* se halla en sentido contrario en un estado singlete, cualquiera que sea la dirección elegida. Una vez que sabemos que *B* tiene su spin en sentido contrario, podemos predecir la probabilidad de cualquier medición del spin en *B*, aun cuando *B* esté lejos de *A*.

Esta situación no tiene nada que ver con la propagación de señales a una velocidad mayor que la de la luz. El montaje experimental discutido en el artículo, o cualquier otra combinación de mediciones efectuadas en un estado cuántico extendido, no puede utilizarse nunca para la transmisión de señales.

La mecánica cuántica nos sitúa frente a una realidad mucho más rica de lo que estamos habituados a encontrar en la física macroscópica. Por ello logró descubrir lo que realmente observamos a nivel atómico. En particular cuando el estado cuántico se extiende a distancias macroscópicas, como lo hace el experimento descrito por d'Espagnat y en la cuestión de los fenómenos de superconductividad (el efecto Josephson), nos topamos con correlaciones inesperadas y enigmáticas entre las medidas efectuadas en puntos distintos.

2) *Réplica de D'Espagnat.*– Ante todo discrepo del profesor Weisskopf cuando afirma que el artículo en discusión está "basado en una definición más bien estrecha de la realidad, en concreto en la aplicabilidad de conceptos que utilizamos al tratar con objetos macroscópicos, como la posición, velocidad o momento angular". El artículo en absoluto se ha basado en una suposición a priori de este tipo. De hecho se basa en una suposición no a priori, pues está construido como un teorema, es más, como una prueba *a contrario*. La finalidad esencial es demostrar que un conjunto de tres, y sólo tres, hipótesis (o premisas) muy generales, a saber, realismo, el uso libre de la inducción y la separabilidad einsteiniana, tienen consecuencias que son contrarias a las predicciones de las reglas cuánticas *y* a los hechos observados, por lo que al menos una de las premisas debe ser falsa. Naturalmente cuando un matemático desarrolla una prueba que demuestra que una suposición *a* lleva una consecuencia *b* falsa (y debe por lo tanto ser rechazada), ¡no debería ser criticado por considerar, a resultas de la prueba, la posibilidad de que *a*, o alguna proposición deducida de *a*, pudiera ser verdadera!

Es cierto que la validez de cualquiera de estas pruebas *a contrario* depende de la ausencia en ella de suposiciones suplementarias implícitas (cuya falsedad podría entonces ser responsable de la falsedad de la conclusión). Pero sería ridículo por mi parte pretender una certidumbre con tanta exhaustividad. No obstante, mantengo que los diversos detalles apuntados superficialmente por Weisskopf no constituyen suposiciones suplementarias de este tipo. Por ejemplo, es indiferente para la prueba que la observación "en muchos casos destruye las condiciones de la existencia del estado [cuántico]". La prueba se construye de tal forma que garantice esta irrelevancia (siempre, desde luego, que se acepten las premisas). De forma similar, mi afirmación de que el spin de un protón de un par en estado singlete tiene varias componentes bien definidas no es una presunción suplementaria; se deriva de las premisas. (El punto clave es la definición de la "propiedad A".)

En ese momento Weisskopf me hace una segunda crítica. Sin tener que recurrir a la experimentación yo tenía que saber a priori que la afirmación analizada antes debía ser falsa, por contradecir las relaciones de incertidumbre. Tampoco puedo aceptar esta segunda objeción. En mi opinión se basa en una identificación acrítica de algunos elementos del formalismo matemático (aquí los "estados cuánticos") con elementos de realidad objetiva independiente. Y, por tanto, olvida el punto principal que subyace en nuestras recientes investigaciones, a saber: ante las dificultades, bien conocidas, que implican esos compromisos a priori, quizá sea interesante dejarlos de lado siempre que sea posible. Debemos tener presente, no obstante, que no existe ninguna prueba correcta de que las relaciones de incertidumbre no remitan simplemente a ignorancias inevitables de algunos detalles físicos más finos, irrelevantes para las predicciones. Por consiguiente, para someter a prueba las premisas hemos de desarrollar más el argumento y, en última instancia, dejar que el experimento decida por nosotros. Puesto que el experimento es factible, cualquier otra actitud, creo yo, estaría impregnada de un cierto dogmatismo.

En lo que atañe a la no separabilidad, tanto mi artículo como la crítica de Weisskopf subrayan que es bien conocida en la mecánica cuántica. Pero cuando argumenta que el artículo no dice nada nuevo, otra vez pasa por alto que desde la obra de John S. Bell la inseparabilidad cuántica podía lógicamente considerarse como una mera característica del formalismo, no como una propiedad de realidad independiente. En este sentido, los experimentos a que se hace referencia aportan nuevos conocimientos, y estos conocimientos son bastante importantes.

Quiero añadir ahora unas pocas palabras acerca de las ideas de Weisskopf, que quedan resumidas en la frase "los postulados de la mecánica cuántica no contienen razones por las que ésta deba renunciar al concepto de una realidad independiente de nuestra mente." La declaración es explícita. Pero, como dije, está lejos de reflejar la complejidad del problema real. Si lo hiciera, ¿cómo podríamos entender, por ejemplo, las afirmaciones de Heisenberg de que la moderna física atómica "no puede ya relacionarse con cualquier Naturaleza-en-sí-misma" y "es un mero eslabón en la infinita cadena de diálogos entre el Hombre y la Naturaleza"? La simple existencia de estas frases debiera, creo, servir de advertencia frente a los peligros de excesivas simplificaciones epistemológicas. Como dice el mismo Weisskopf, no debiéramos descuidar las indicaciones de Heisenberg. En efecto, un hecho objetivo entorno a la mecánica cuántica es el amplio abanico de puntos de vista que abriga, incluso entre los físicos más notables, en relación con el problema de sus fundamentos en la realidad. El trabajo descrito en mi artículo debiera servir para acotar y resolver una parte especial de este problema. Y al considerar la sutileza de la crítica, me pregunto si, finalmente, el rotundo pronunciamiento de Weisskopf, y no mi propio artículo (a pesar de su críptico preámbulo), entraña mayor peligro de que el lector adquiera una "impresión distorsionada" de la esencia de la mecánica cuántica.

Existe, lamentablemente, otro hecho objetivo en relación con la mecánica cuántica. Es que sus reglas de cálculo están absolutamente bien definidas. Esto es cierto incluso hasta el grado de que pueden formar la base de una nueva clase de objetividad: una objetividad centrada en el hombre, que podría muy bien bastar para la erección del cuerpo completo de la ciencia positivista.

El sapo heterodoxo

El "dogma central" de la moderna biología afirma que, en todas las células vivas, las instrucciones codificadas para la síntesis de proteínas se transcriben de ADN en ARN. En esa línea, un gen es un segmento de ADN que especifica una molécula producto. Aunque el mecanismo de la transcripción (el código y la maquinaria de transcripción) se ha considerado virtualmente universal para todas las formas de vida, se acaba de informar que los orgánulos celulares denominados mitocondrias utilizan un código ligeramente aberrante. Y hemos llegado ahora al conocimiento de una diferencia que afecta a la maquinaria; y supone que, en los animales, hay un con-

trol sobre la transcripción que no existe en las bacterias.

La diferencia es la siguiente. En los genes de la bacteria *Escherichia coli* la transcripción del ARN sobre un filamento molde de ADN comienza típicamente con la unión de un enzima (la molécula que realiza la transcripción) a un promotor, un segmento de ADN no transcrito que está situado al final del molde. Aunque se desconocen los pormenores de la unión enzimática en el sapo *Xenopus laevis*, sí se sabe que la transcripción de un determinado tipo de ARN a partir de ADN está dirigida por una región no situada al final del molde sino en su mitad. Ello significa que en *Xenopus* un fragmento del gen actúa, a la vez, de código que se transcribe y de control de la transcripción.

Daniel F. Bogenhagen, Shigeru Sakonju y Donald D. Brown desarrollaron en el Departamento de Embriología de la Institución Carnegie de Washington los experimentos que pusieron de manifiesto esta diferencia. Comunicaron sus hallazgos en un reciente número de la revista *Cell*. El gen con que trabajaron es el denominado ADN 5*S*. Se encuentra, con cientos de copias dobles, en casi todos los cromosomas de *Xenopus* y se transcribe en ARN 5*S*. Este ARN forma parte de los ribosomas, orgánulos intracelulares donde se sintetizan las proteínas. La región que se transcribe abarca 120 bases nitrogenadas. (La secuencia de estas bases constituye el código genético tanto en el ADN como en el ARN.) El gen está flanqueado por "ADN espaciador" cuya función se desconoce. El ADN espaciador no se transcribe.

Los experimentos comprendían varias fases. Primero, mediante enzimas, se eliminaba cierto número de bases en un extremo u otro de un filamento de ADN que contuviera el ADN 5*S* y el ADN espaciador que lo rodea. Luego, se insertaba el segmento recortado en un plásmido: un filamento circular de ADN bacteriano con capacidad de autoduplicación. El plásmido, inserto después en la bacteria, se autoclonaba. Por tanto, la bacteria y su descendencia constituían una fuente de innumerables copias del ADN bacteriano que contenía el ADN de *Xenopus* con la deleción experimental. Se purificaba el ADN y se introducía en un extracto obtenido a partir de núcleos de ovocitos de rana (precursores de los óvulos). En el extracto se encontraba la maquinaria intracelular que permitiría al ADN delecionado de *Xenopus* expresarse a sí mismo, siempre que tuviera capacidad para hacerlo.

Para los investigadores de la Carnegie los resultados eran una auténtica cascada de sorpresas. Primero, la eliminación del ADN espaciador no parecía tener consecuencias: el ADN 5*S* se transcribía igualmente. El espaciador no contenía promotor. Segundo, la eliminación de hasta 50 bases en uno de los terminales del ADN 5*S* (el final 5') provocaba menos alteraciones de las previstas: el gen podía aún servir de molde para la síntesis de ARN. El ARN resultante, sin embargo, era una molécula híbrida que sólo en parte de su longitud contenía la secuencia de bases del ARN 5*S*. La secuencia de bases restante se transcribía a partir del ADN bacteriano de la región de inserción, en el plásmido. El punto crucial era la longitud de los ARN. Abarcaban de 116 a 121 bases: la longitud del ARN 5*S*. Si se eliminaban más de 54 bases, la síntesis era escasa o nula.

La eliminación de bases en el otro extremo del ARN 5*S* (el final 3') comportaba mayor dificultad en los experimentos, pues las deleciones practicadas en este extremo eliminaban la región del ARN que codificaba para el fin de la transcripción. (En el ADN 5*S* de *Xenopus* esta región es una secuencia de cuatro bases de timina en las posiciones 119 a 122.) Por tanto, los investigadores no podían ya simplemente practicar el ensayo con extracto de ovocitos para el ARN de longitud 5*S* al objeto de determinar si funcionaba o no el gen. El ARN podía tener cualquier longitud. Los investigadores de la Carnegie desarrollaron un ensayo alternativo. Añadían al extracto de ovocito un constituyente de ARN modificado: una base que, al ser incorporada a la transcripción, impedía la aceptación de otras bases. La adición de esta substancia en una concentración conocida conducía a una distribución por tamaños de los filamentos de ARN sintetizados. Cada uno acababa con una base modificada. A partir de la distribución podía deducirse la posición en el molde de ADN en que había comenzado la transcripción.

El resultado fue que si la eliminación enzimática de bases a partir del terminal 3' del ADN 5*S* dejaba intactas al menos las primeras 83 bases, se sintetizaba el ARN. Si la eliminación traspasaba la base 80, la síntesis ya no tenía lugar. En resumen, una región del ARN 5*S* de *Xenopus* situada entre las bases 50 y 55 (contando a partir del final) y entre las bases 80 y 83 (contando desde el principio) dirigía de alguna forma la expresión del gen. Esta región ocupaba aproximadamente la cuarta parte del gen y estaba situada en su centro.

Los investigadores de la Carnegie no disponen de pruebas directas de que algún enzima se una a la región mencionada. Y prefieren denominar a su descubrimiento región controladora, en vez de promotor. Por último, los investigadores conjeturan que un enzima interacciona con la región controladora y es inducido por la interacción a desplazarse unas 50 bases contracorriente y comenzar la transcripción del molde. El análisis del ADN bacteriano que sigue a la región controladora mediante su inclusión en un plásmido sugiere que el enzima se adapta mejor a alcanzar una base de guanina y comenzar desde allí la transcripción.

Arte geométrico griego

La prohibición que limitaba el ingreso en la Academia de Platón —"no entre aquí quien no sepa geometría"— expresa claramente la convicción de los griegos, más intuida que comprobada desde los albores de su historia, de que el mundo sensible, el cosmos, poseía una estructura geométrica, matemática. No extrañe, por ende, que los orígenes de su arte sean pura y rigurosamente geométricos, pero de una geometría muy especial.

Artes geométricas, en efecto, las hay desde el Neolítico en muchas partes del mundo. ¿Qué otra cosa es, si no, lo que hace un labriego cuando saca de navaja y se pone a decorar el yugo de sus bueyes o el puño de su cayado? Lenta pero firmemente la hoja acerada va tallando rayas, triángulos, círculos, estrellas. Parece como si los agricultores y los pastores llevasen en la masa de la sangre la propensión a la geometría y la abstracción en la misma medida en que los cazadores tienden, en cambio, al arte figurativo y realista.

Comoquiera que sea, los griegos no se hubieran granjeado la fama que tienen de artistas geniales si no hubieran hecho más que eso. No; por encima de eso, los griegos aspiraron al número. Esto está claro en el entredicho de Platón y lo está también, admirablemente, en multitud de pasajes de Valle Inclán, un escritor moderno que supo calar en la literatura y en el arte antiguo lo bastante a fondo para decir cosas tan sustanciosas como ésta:

"La edad de oro amanecía, y los griegos, divinos pastores, contemplaban aún las pálidas estrellas. Era en el silencio de las majadas, sobre las colinas con olivos, entre los perros vigilantes. Aquellos cabreros tenían los ojos soberanos de las águilas y todas sus intuiciones las arrancaron a la celeste entraña del Sol. Los bosques de sagrados senderos, los arroyos claros, las grutas de donde vuelan en los ocasos los pájaros de alas anchas, las sombras de los laureles, las playas lejanas y doradas con el mar azul, fueron los pobladores de sus almas... No

recibían el conocimiento del mundo como una herencia fría en la urna de las palabras... Para aquellos pastores las ideas significaban números y formas bajo el ritmo del Sol" (*La lámpara maravillosa*).

No era la suya, con todo, una época dichosa, impregnada del aire idílico que en estas sonoras frases acabamos de aspirar. Por el contrario, en la Grecia de hacia 1100 a.C. apenas quedaba títere con cabeza tras la conmoción experimentada por los burgos micénicos. Pocos de ellos subsistían –las acrópolis de Atenas y de Yolkos en Europa, Mileto en Asia– y aun éstos en precario y aislados unos de otros. Los indicios que tenemos no pueden ser más desoladores después del esplendor pasado. Ahora nadie construye; es más, se olvida hasta tal extremo la técnica de la construcción, que la gente vive entre las ruinas de los edificios antiguos, dondequiera que encuentra cobijo, un techo bajo el que guarecerse, o incluso en cuevas. El nivel de subsistencia desciende a sus cotas más elementales, sin comercio, sin medios de transporte. Los atenienses ignoran qué pasa en la costa de Asia y en las islas, porque no se encuentra un barco que le lleve a uno a alguna parte. Si no fuese por los alfares y por las fundiciones de los broncistas que se observan aquí y allá y mantienen vivas aquellas técnicas que a tanta altura habían rayado en la civilización pasada, parecería que la humanidad estaba regresando a la prehistoria. Es en verdad prodigioso que el espíritu griego lograra sobreponerse a aquella situación y salir triunfante con la brillantez con que lo hizo.

La historia del arte griego de estos siglos oscuros –desde 1100 hasta casi el 700 a.C.– está exclusivamente representada por la cerámica pintada, y sólo en el último trecho –el siglo VIII– su panorámica se enriquece con los bronces, las terracotas, los marfiles y la orfebrería, de estilo geométrico también. Pero aunque lo limitemos a la cerámica, el espectáculo es admirable; es la infancia, la edad escolar de Grecia. El siglo XI pertenece aún a un período de transición más vinculado al pasado que al futuro; por eso se le llama *submicénico*. El repertorio del ceramista acusa el empobrecimiento reinante en todos los órdenes de la vida. De las 68 formas que salían de los alfares micénicos subsisten nada más que 10. Y es natural que así sea, cuando no hay necesidades para tantas. El ceramista concibe el vaso dentro de un espíritu más bien conservador: el recipiente es para él, por encima de todo, un volumen en el espacio, y la decoración pintada –tal vez unas líneas onduladas, o un pulpo estilizado y un tanto asimétrico– tiende a reforzar esa impresión tridimensional, como si quisiera deslizarse desde el primer plano hacia el fondo y así rodear el vaso.

Tras la depresión de los siglos XII y XI, se observan los primeros síntomas de recuperación. Del 1025 podrían datar, a lo menos en Atenas, sus manifestaciones más precoces. El término de "submicénico" que acabamos de emplear ya no conviene; para este nuevo período ascensional emplearemos el término de *protogeométrico*, dándole vigencia hasta el 925 a.C. o un poco antes en los centros más dinámicos e inquietos (Atenas, Corinto y algunas alfarerías de la Argólida). En el repertorio de formas se observa un ascenso de 10 a 17, la eliminación de alguna de las antiguas, como el búcaro de estribo, la invención de la taza de dos asas horizontales (*skyphos*), y la promoción del ánfora, la hidria y la crátera que ya nunca declinarán.

El estilo protogeométrico pudo nacer en Atenas, o en ésta y en otras ciudades a la par, pero comoquiera que fuese, en Atenas tuvo su guía, la fuente más copiosa de iniciativas. No quiere ello decir que ésta crease de repente el rico y variado lenguaje del geométrico maduro, sino que estableció las normas e implantó las novedades que habían de hacerlo posible.

Los círculos concéntricos, uno de los contados ornamentos curvos del nuevo estilo, pueden servir de emblema a éste con la misma justeza con que las espirales caracterizan al estilo minoico y micénico. No cabe, en efecto, mayor contraste que el que ofrece, por una parte, la espiral prehelénica, infinita, abierta, sugerente de movilidad, y, por otra, los círculos concéntricos del protogeométrico, finitos, cerrados, inmóviles.

Tanto o más expresivo que ese contraste, por cuanto implica un cambio radical de concepto en la mente del ceramista, es el hecho de que los vasos dejen de ser meros volúmenes espaciales para adquirir valores de esculturas. La antigua preocupación por el espacio, por la tercera dimensión, que había llevado a fabricar vasos con tres asas iguales y a la misma altura, como para evitar que alguien viese en ellos un pecho y una espalda, cambia de objetivo al fijarse ahora como tal una estructura antropoidea, con un claro eje de simetría bilateral. El eje horizontal del ánfora panzuda se refuerza mediante una ancha faja, con un triglifo en medio, indicador del eje, mientras que el resto se pinta de negro y el cuello y el pie adquieren entidad suficiente para sugerir, siquiera remotamente, una figura viva en posición de firme. (Antonio Blanco Feijeiro.)

Proteínas útiles obtenidas a partir de bacterias recombinantes

Bacterias en las que se han introducido genes no bacterianos pueden producir proteínas no bacterianas. Entre las proteínas sintetizadas por métodos de recombinación del ADN están la insulina y el interferón

Walter Gilbert y Lydia Villa-Komaroff

La célula es una fábrica de proteínas. Sintetiza enzimas y otras proteínas que mantienen su propia integridad y sus procesos fisiológicos; en organismos pluricelulares a menudo sintetiza y excreta otras proteínas que realizan diversas funciones especializadas tendentes a la conservación de la vida del organismo como un todo. Distintas clases de células producen proteínas diferentes, siguiendo instrucciones codificadas en el ADN de sus genes. Los recientes avances en biología molecular han hecho posible alterar estas instrucciones en células bacterianas, y, de esta forma, diseñar bacterias que puedan sintetizar proteínas no bacterianas. Estas bacterias son "recombinantes". Contienen, junto con sus propios genes, parte o todo un gen de una célula humana u otra célula animal. Si el gen insertado codifica para una proteína con una aplicación biomédica importante, un cultivo de bacterias recombinantes, que puede desarrollarse fácilmente y a bajo costo, trabajará, cual fábrica rentable, en la producción industrial de esa proteína.

En muchos laboratorios universitarios y en la incipiente industria de "genética aplicada" se está investigando para diseñar bacterias capaces de sintetizar tales proteínas no bacterianas. Un conjunto cada vez mayor de técnicas de "ingeniería genética" permite aislar un gen de entre los varios millones de que dispone una célula animal, fusionarlo con parte de un gen bacteriano e insertar en bacterias la combinación de ambos. Al multiplicarse, las bacterias producen millones de copias de sus propios genes y del gen animal en ellos inserto. Si el gen animal se une a un gen bacteriano de forma que la bacteria actúe sobre él como si fuera propio, la bacteria sintetizará la proteína especificada por el gen animal. Los nuevos métodos de determinar rápida y fácilmente la secuencia exacta de los grupos químicos que constituyen una molécula de ADN permiten identificar la estructura detallada de los genes "clonados". Una vez conocida ésta, podemos manipularla para producir estructuras de ADN que funcionen de un modo más eficiente en la célula bacteriana.

En este artículo describiremos primero algunas de estas técnicas de una forma general y luego explicaremos cómo nosotros y nuestros colegas Argiris Efstratiadis, Stephanie Broome, Peter Lomedico y Richard Tizard aplicamos dichas técnicas en nuestro laboratorio de la Universidad de Harvard a fin de copiar un gen de rata que codificaba para la hormona insulina, insertarlo en bacterias, y lograr, por último, que las bacterias produjeran un precursor de la insulina. En una atractiva aplicación de esta tecnología, Charles Weissmann y sus colegas de la Universidad de Zurich obtuvieron recientemente una bacteria que producía interferón humano, una proteína antiviral que puede llegar a ser de gran utilidad.

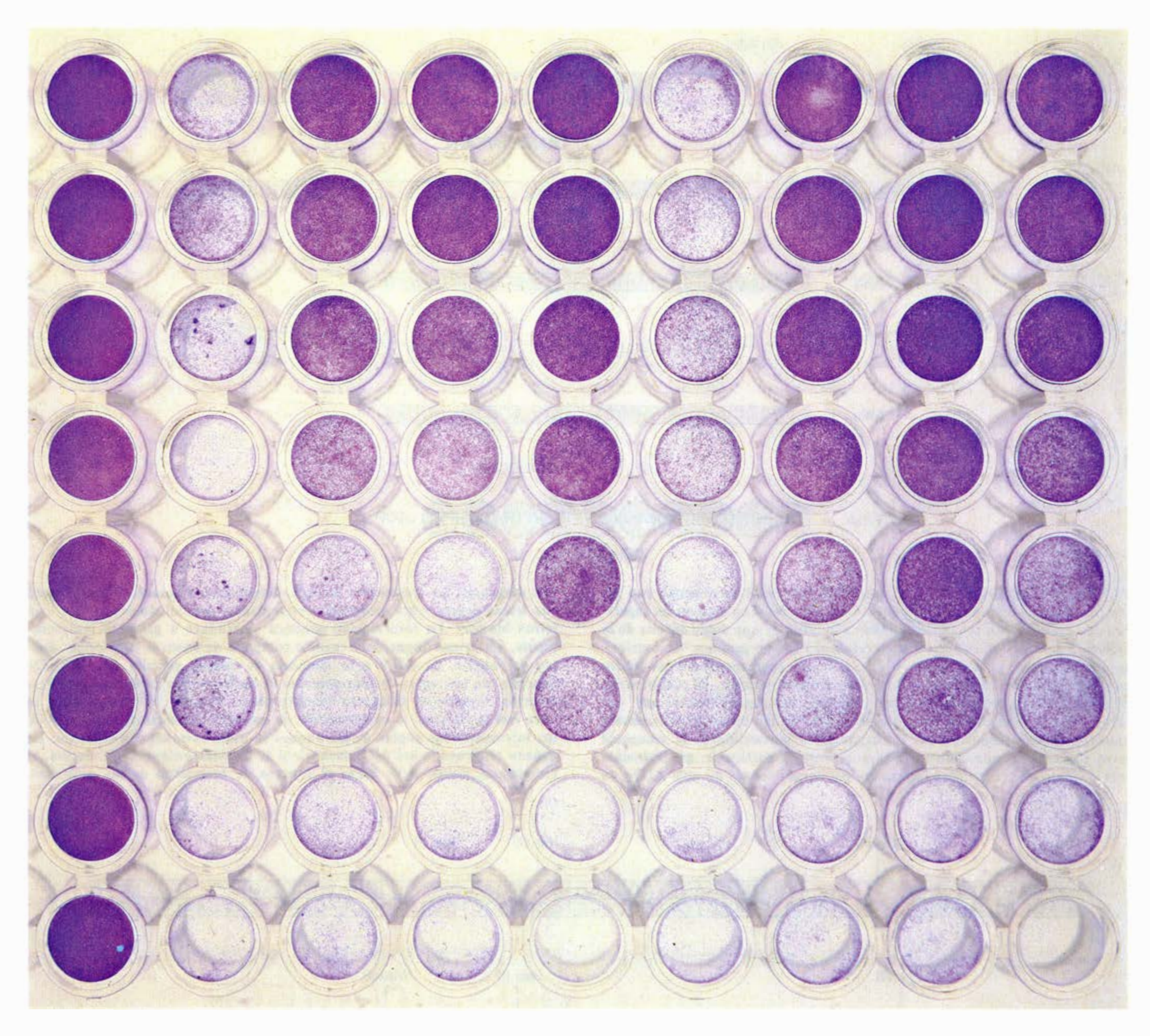
ADN, ARN y proteínas

Las células producen proteínas al traducir una serie de órdenes distribuidas a lo largo de una cadena de ADN. Esta información hereditaria está contenida en la secuencia de cuatro compuestos químicos de dicho ácido nucleico: las bases adenina, timina, guanina y citosina. En grupos de tres, a lo largo del ADN, estas bases especifican qué aminoácidos (unidades fundamentales constitutivas de las proteínas) han de utilizarse para formar una proteína; la correspondencia entre los tripletes de bases específicas y determinados aminoácidos se denomina código genético. Llamamos gen estructural al segmento de molécula de ADN que contiene la información que especifica la estructura de una proteína.

Para expresar esta información, la célula transcribe las secuencias de bases de su almacén genético en el ADN a otra molécula: el ARN mensajero. Una cadena de ADN sirve de molde para la formación de una cadena complementaria de ARN, de acuerdo con las reglas de apareamiento de las bases: la adenina siempre se aparea con el uracilo (que en el ARN reemplaza a la timina del ADN), y la guanina con la citosina. En las células animales la transcripción tiene lugar en el núcleo de la célula. Las moléculas de ARN mensajero llevan la información desde el núcleo hasta el citoplasma, donde una maquinaria molecular compleja lo traduce en proteína a través de la unión de los aminoácidos apropiados. En las bacterias, que carecen de núcleo, la transcripción y la traducción tienen lugar simultáneamente. El ARN mensajero opera como un conjunto temporal de instrucciones. Los tipos de proteína elaborados por la célula dependen de los mensajeros que contiene en un momento determinado; para sintetizar una proteína diferente, la célula forma un nuevo mensajero a partir del gen estructural apropiado. El ADN de todas las células contienen la información requerida en cualquier momento por cualquier célula del organismo, pero cada una de ellas "expresa" (esto es, traduce en proteína) sólo una pequeña porción específica de esa información. ¿Cómo sabe la célula qué genes estructurales debe expresar?

Además de la información estructural, una molécula de ADN contiene una serie de órdenes reguladoras codificadas también en forma de secuencia de bases. La más simple de estas órdenes indica "Comenzar aquí" o "Terminar aquí", tanto para la transcripción como para la traducción. Ordenes más complejas indican cuándo y en qué tipo de células debe usarse un gen específico. El código genético es el mismo en todos los núcleos

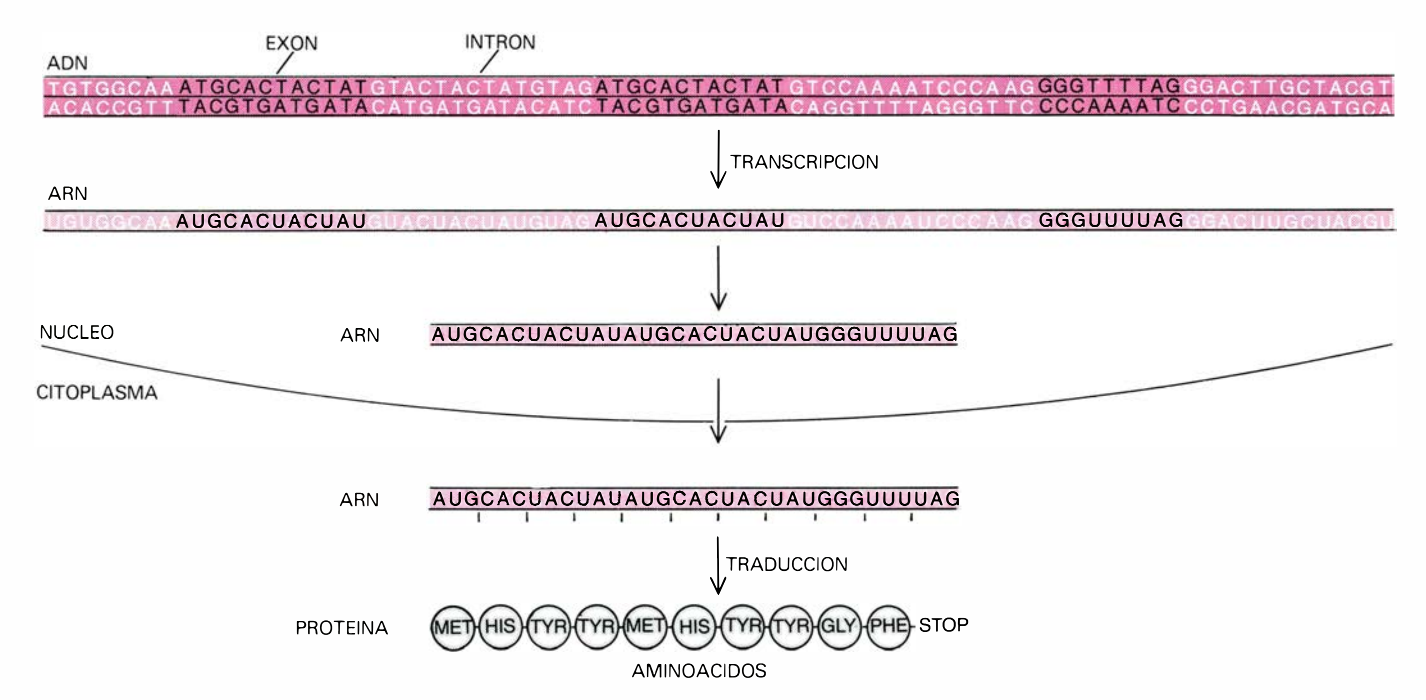
celulares, de forma que una secuencia estructural determinada especifica la misma proteína en cada organismo, pero las órdenes especiales no son las mismas en bacterias y en células animales. Una de las diferencias más sorprendentes no fue descubierta hasta hace dos años. La información para una proteína bacteriana está codificada en un fragmento continuo de ADN, pero en organismos más complejos, como los cerdos o las personas, la información estructural está dividida en diferentes segmentos, separados a lo largo del gen por largos fragmentos de otro ADN, denominado ADN intercalado, o "intrones". En estas células, una región larga (frecuentemente diez veces más larga de lo necesario) se transcribe en ARN. Las células procesan esta larga molécula de ARN, cortando las secuencias de bases que no codifican para proteína y uniendo el resto, dando lugar así a moléculas de ARN mensajero que contienen esencialmente la señal de comienzo, la secuencia estructural y la señal terminal necesarias en la traducción.



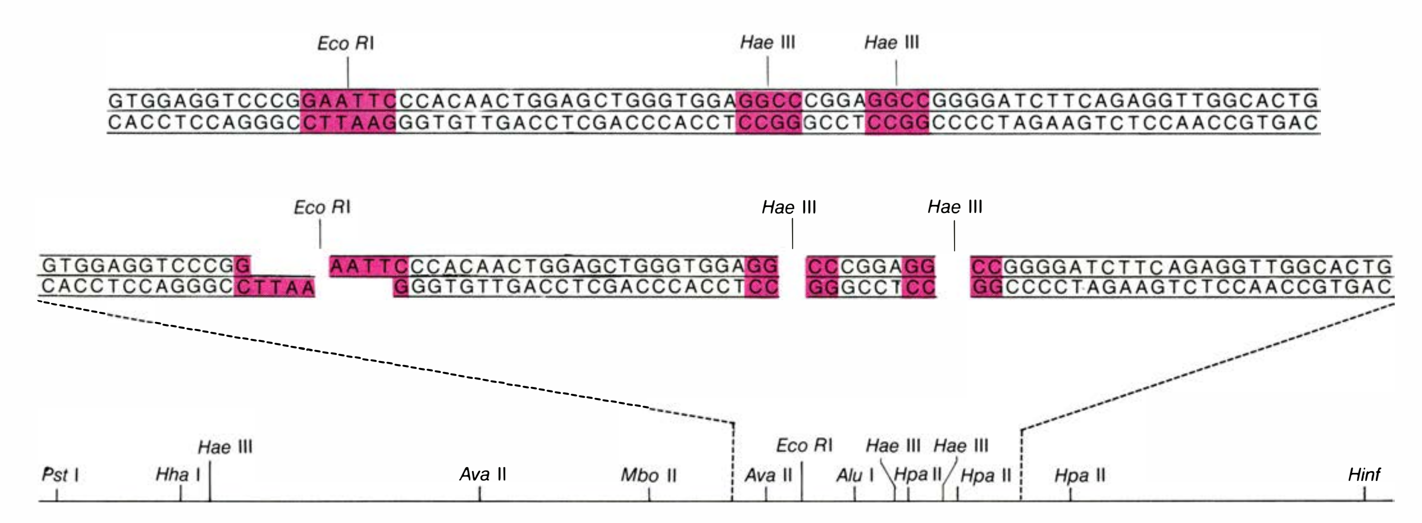
INTERFERON HUMANO sintetizado en bacterias. Dicha proteína demostró en este bioensayo su capacidad de bloquear una infección vírica. La información estructural necesaria para la síntesis del interferón se obtuvo de glóbulos blancos humanos en forma de moléculas de ARN mensajero; el ARN sirvió de molde para la síntesis de moléculas bicatenarias de ADN, y el ADN a su vez se insertó, mediante técnicas de recombinación de ADN, en una cepa de laboratorio de la bacteria *Escherichia coli*, que sintetizó la proteína. En el ensayo se colocaron diluciones de un extracto de las bacterias en algunos de los pocillos de una bandeja de plástico transparente; los pocillos restantes sirvieron de control. (En esta fotografía se aprecian los pocillos desde la parte inferior de la bandeja.) Se añadió células humanas a los pocillos, manteniéndolas en cultivo hasta la formación de una capa celular en el fondo de cada pocillo. Se incorporó entonces en las células una preparación de virus. A las 24 horas se tiñó la capa de células. Donde el interferón había protegido a las células frente al virus, éstas sobrevivieron y quedaron teñidas. Donde no había interferón, el virus destruyó las células, no pudiendo éstas incorporar el colorante. Los pocillos de la primera columna, a la izquierda, contenían una capa de células que no fue expuesta al virus; consecuentemente, aparecen teñidas. Los pocillos control de la segunda columna contenían células destruidas por el virus; aparecen grises o claras. Los pocillos control de la tercera columna contenían diluciones de una muestra estándar de laboratorio de interferón obtenido directamente de células humanas; en el pocillo superior, el interferón tiene una concentración máxima, y cada pocillo siguiente está a una concentración de interferón tres veces menor que el inmediatamente anterior. Los pocillos de las seis columnas siguientes contenían diluciones de extractos bacterianos de seis colonias distintas de *E. coli* en que estaba presente el ADN del interferón. Cinco de las seis columnas con extractos bacterianos evidenciaron actividad del interferón. El tercer extracto ensayado (sexta columna) no poseía interferón detectable; aparentemente no tenía completo el gen del interferón. La síntesis de interferón humano mediante el método de ADN recombinante fue logrado por Charles Weissmann y sus colegas y Kari Cantell. El trabajo fue financiado por Biogen, S. A. El interferón se sintetiza en muchas células animales, pero es característico de cada especie: sólo el interferón humano protege las células humanas. Se presenta en cantidades tan diminutas que resulta difícil lograr experimentos satisfactorios.

Persuadir a una bacteria para que produzca una proteína no bacteriana requiere introducir en ella una molécula de ADN que tenga una secuencia de bases que especifiquen los aminoácidos de la proteína, así como las instrucciones bacterianas para la transcripción y la traducción. Es más, el ADN insertado debe ser tratado por la bacteria como suyo propio, de forma que se duplique cuando la bacteria se divida. El problema, por consiguiente, puede dividirse en tres partes: encontrar la secuencia estructural correcta (por ejemplo, la de la insulina), colocarla en la bacteria de forma que se conserve cuando la bacteria crezca y manipular entonces la información que la rodea, modificando las órdenes reguladoras de suerte que la secuencia estructural se exprese en proteína. Una vez producida la proteína, quizá se precisen todavía cambios posteriores en su gen o modificaciones de la bacteria para obtener la proteína en cantidad suficiente para que sea útil.

El conjunto de técnicas de recombinación de ADN que tienen como finalidad



FABRICACION CELULAR DE LAS PROTEINAS de acuerdo con las instrucciones codificadas en los genes. Consisten éstos en secuencias específicas de grupos químicos (bases) unidas a lo largo de una doble cadena de la molécula de ADN en el núcleo de la célula. El código genético "se escribe" en un alfabeto de cuatro letras *A*, *T*, *G* y *C*, que corresponden a las cuatro bases adenina, timina, guanina y citosina, respectivamente. El código se lee en grupos de tres letras denominados codones, que especifican los aminoácidos de la cadena de proteína. La secuencia de las bases puede también implicar órdenes reguladoras. En organismos pluricelulares la secuencia estructural o gen, que codifica para una proteína particular, generalmente está dividido en fragmentos separados por largos trozos de otro ADN; en este diagrama, los fragmentos del gen, denominados exones, se representan con letras negras y las secuencias intercaladas, denominadas intrones, con letras blancas. La información genética se traduce a proteína indirectamente. En primer lugar, la secuencia completa de bases se transcribe, dentro del núcleo, de ADN a la molécula de cadena sencilla de ARN. De acuerdo con las reglas de apareamiento de las bases que gobiernan la transcripción, la adenina se aparea siempre con el uracilo (*U*) y la guanina lo hace con la citosina. A continuación, se escinden del mensaje las copias de los intrones, y las copias de los exones se unen extremo con extremo. La cadena reagrupada del ARN mensajero se traslada entonces, del núcleo, al citoplasma, donde tiene lugar el proceso de formación de las proteínas.

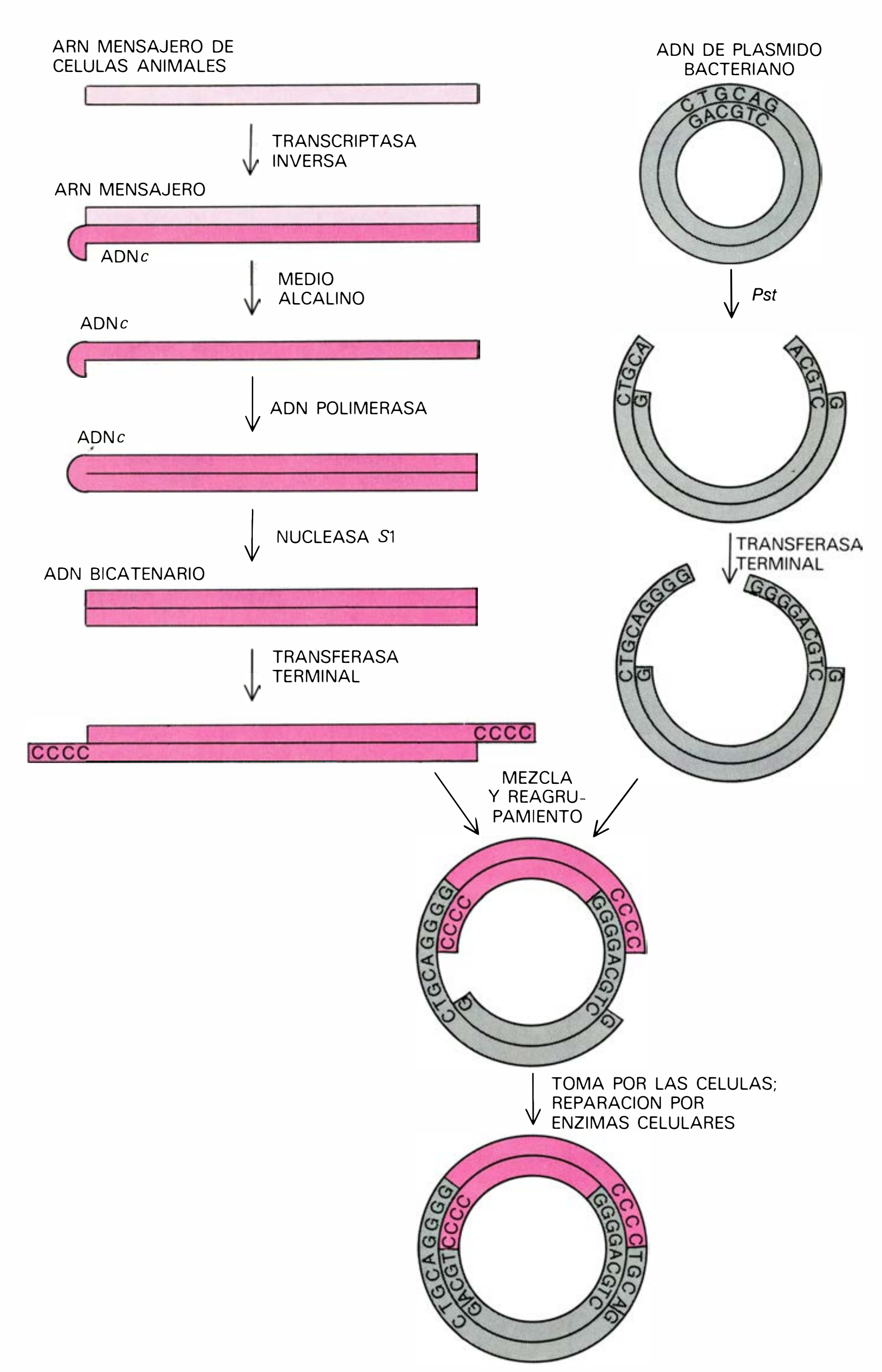


FRACCIONAMIENTO DEL ADN en segmentos relativamente cortos mediante endonucleasas de restricción, enzimas especiales que reconocen secuencias específicas de bases por donde cortan la molécula. Por ejemplo, *Eco RI*, el primero de estos enzimas descubierto, reconoce cierta secuencia de seis bases y corta la molécula dondequiera que aparezca la secuencia en cuestión, en tanto que *Hae* III, otro enzima de restricción, opera sobre una secuencia de cuatro bases. Puesto que la probabilidad de encontrar una determinada secuencia de cuatro bases es mayor que la de hallar la secuencia de seis bases, puede esperarse que *Hae* III corte el ADN más frecuentemente que *Eco RI*. De acuerdo con esto, en el segmento de ADN de la parte superior de la figura, que corresponde a parte del gen que codifica para la insulina en células de rata, se representa un punto *Eco RI*, y dos *Hae* III. El mismo ADN contiene puntos de reconocimiento para un cierto número de enzimas de restricción, como se muestra en el diagrama lineal inferior.

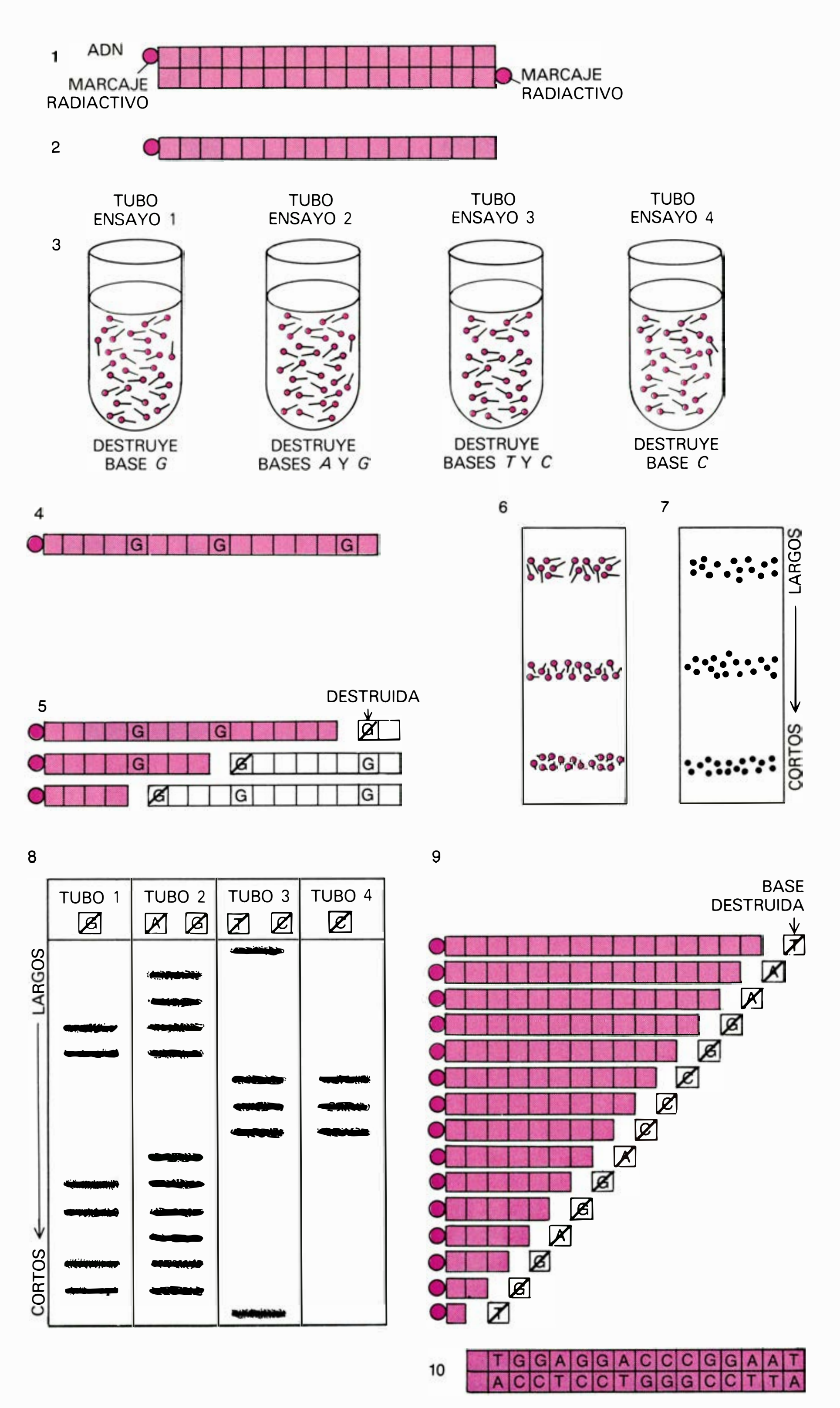
introducir y mantener un nuevo gen en una bacteria se denomina "clonaje", que, en este contexto, viene a significar el aislamiento de una nueva secuencia específica de ADN y su inserción en un organismo único capaz de proliferar para formar una población de descendientes idénticos: un clon. Existen dos formas adecuadas de realizar este proceso. En un método, un pequeño fragmento circular de ADN denominado plásmido constituye el vehículo introductor del nuevo ADN en la bacteria. Los plásmidos sólo contienen unos pocos genes propios y se mantienen en forma de varias copias dentro de la bacteria merced a la propia maquinaria genética de la bacteria: permanecen separados del conjunto principal de genes bacterianos contenidos en un anillo de ADN, mil veces mayor aproximadamente. Y el vehículo puede ser también un virus capaz de crecer en bacterias. Tales virus suelen poseer de 10 a 25 genes propios (una bacteria tiene varios miles de genes) y, con frecuencia, se les ve transportar segmentos extraños de ADN en vez de parte de su propio ácido desoxirribonucleico. Todas las técnicas que describamos se referirán tanto a plásmidos como a virus.

La molécula de ADN se asemeja a una hebra retorcida, muy larga. Una bacteria contiene ADN, de un milímetro de longitud, en una cadena continua de unos tres millones de bases, doblada varios miles de veces en un espacio que no alcanza, en su diámetro, la micra (milésima parte del milímetro). El ADN de las células humanas está empaquetado en 46 cromosomas; cada uno de los cuales, constituyendo una pieza única, mide unos cuatro centímetros de longitud. La cantidad total corresponde aproximadamente a 3000 millones de bases. ¿Cómo es posible encontrar y trabajar con un único gen que apenas abarca unos miles de bases? Afortunadamente, la naturaleza ha ideado ciertos enzimas (proteínas que llevan a cabo reacciones químicas) capaces de resolver parte del problema. Estos enzimas especiales, denominados endonucleasas de restricción, gozan de la facultad de rastrear las largas cadenas de ADN y reconocer cortas secuencias específicas como marcas por donde cortar la molécula. Se conocen entre 40 y 50 enzimas de éstos, cada uno de los cuales reconoce diferentes secuencias de bases. Por tanto, cada enzima de restricción puede romper reproductiblemente cualquier ADN en un conjunto característico de pequeñas piezas, desde unos pocos cientos a unos pocos miles de bases, que podemos aislar en función de su longitud.

Estas piezas de ADN pueden clonar



TECNICA DE RECOMBINACION DEL ADN para la producción de proteínas en bacterias. Dicha técnica requiere la inserción de un fragmento de ADN animal que codifique para la proteína en cuestión en un plásmido (un pequeño fragmento circular de ADN bacteriano), que, a su vez, sirve de vehículo para introducir el ADN en la bacteria. Segmentamos el ADN del plásmido mediante los enzimas de restricción adecuados; se inserta la nueva secuencia de ADN en la abertura a través de una variedad de manipulaciones enzimáticas que conectan los nuevos extremos del ADN con los del plásmido. En el procedimiento que se ilustra aquí, un enzima especial, la transcriptasa inversa, se utiliza primero para copiar, en una molécula monocatenaria de ADN, la información genética contenida en una molécula sencilla de ARN mensajero. A continuación, el ARN molde se destruye y se fabrica una segunda cadena de ADN utilizando otro enzima, la ADN polimerasa. Un tercer enzima, la nucleasa *S1*, rompe la unión covalente entre los dos filamentos del ADN. En la etapa siguiente, el ADN bicatenario se une al plásmido, utilizando en primer lugar el enzima transferasa terminal a fin de extender los extremos del ADN con una secuencia corta de bases idénticas (en este caso cuatro citosinas) y apareando después el ADN con el ADN del plásmido, al que se ha añadido una secuencia de bases complementarias (cuatro guaninas). Los enzimas bacterianos rellenarán posteriormente los huecos en la molécula de ADN circular regenerado y sellarán las conexiones entre el ADN insertado y el ADN del plásmido. El plásmido utilizado por los autores para fabricar proinsulina de rata en bacterias, denominado *pBR*322, contenía dos genes que confieren resistencia a dos antibióticos: la penicilina y la tetraciclina. El plásmido era segmentado con el enzima de restricción *Pst* en un punto de reconocimiento que se encontraba hacia la mitad del gen que codificaba para penicilinasa (el enzima que hidroliza la penicilina). El ADN añadido destruía esta actividad enzimática, pero la resistencia a la tetraciclina permanecía, y se utilizaba para identificar la bacteria portadora del plásmido. (Bunji Tagawa.)



DETERMINACION DE LA SECUENCIA DEL ADN en el método diseñado por uno de los autores (Gilbert) y por Allan M. Maxam. Se inicia con la unión de un marcador radiactivo a uno de los extremos de cada cadena del ADN bicatenario (*1*). Se provoca la separación de las cadenas de billones de moléculas (*2*) y una preparación de una de las dos clases de cadenas se divide en cuatro tubos de ensayo (*3*). Cada tubo contiene un agente químico que destruye selectivamente una o dos de las cuatro bases *A*, *T*, *G* y *C*, fragmentando en consecuencia la cadena en los lugares en que se encuentren dichas bases; la reacción está controlada de suerte que sólo se corten algunas de las cadenas en cada uno de los puntos en los que aparece una base determinada, generando un conjunto de fragmentos de diferentes tamaños. Así, una cadena que contuviera tres *G*(*4*) produciría una mezcla de tres moléculas radiactivas (*5*). La reacción rompe el ADN únicamente en las posiciones *G*, en las posiciones *G* y *A*, en las posiciones *T* y *C* y en las posiciones *C*. Las moléculas se separan de acuerdo con su tamaño por electroforesis en gel; cuanto más corta sea una molécula, más emigrará a lo largo del gel (*6*). El marcaje radiactivo produce una imagen de cada grupo de moléculas sobre una película de rayos X (*7*). Al colocar contiguamente cuatro películas (*8*), el conjunto de bandas en forma de escalera representará todos los fragmentos, cada vez más cortos, de la cadena original de ADN (*9*). Conociendo la base o pares de bases destruidas en la generación de cada fragmento, se puede comenzar desde la parte inferior y leer una secuencia de bases de izquierda a derecha (*10*), y así conocer la segunda cadena.

en bacterias. En un primer paso se purifica el ADN circular de los plásmidos. Las secuencias de los plásmidos son de tal forma que uno de los enzimas de restricción llegará a reconocer un punto del plásmido y cortar el círculo por él. Se puede insertar un fragmento seleccionado de ADN en la abertura mediante una serie de técnicas enzimáticas capaces de conectar sus extremos con los del círculo. Normalmente, esta molécula de ADN recombinante sería incapaz de atravesar la pared celular bacteriana. Sin embargo, una solución diluida de cloruro cálcico torna permeable a la célula; en una mezcla de células tratadas y ADN, algunas bacterias incorporarán el plásmido híbrido. Estas células pueden reconocerse de entre todas las que no hayan tomado el ADN si un gen del plásmido proporciona a la bacteria una propiedad que le permite sobrevivir, por ejemplo, resistencia a un antibiótico. Por consiguiente, cualquier bacteria que posea el plásmido será resistente al antibiótico, mientras que todas las demás serán destruidas por él. Cuando se extiende la mezcla de bacterias sobre una placa de agar que contiene nutrientes y el antibiótico, todas las bacterias con plásmido incorporado crecerán originando cada una de ellas una colonia separada de unos 100 millones de células. Podemos seleccionar una colonia y desarrollarla luego al objeto de que produzca miles de millones de células, cada una de las cuales contendrá una copia idéntica de la nueva secuencia de ADN del plásmido recombinante.

Determinación de la secuencia del ADN

Los procedimientos que hemos indicado hasta aquí se siguen en experimentos de clonaje por "escopetazo". Se fragmenta el ADN de una célula animal en millones de piezas; se inserta cada pieza en una bacteria diferente. De esta manera, se han conseguido colecciones de todos los fragmentos del ADN humano, del ratón, de la rata y de la mosca. Para determinar la estructura de cualquiera de estos ADN clonados, hay que romper el plásmido híbrido con un enzima de restricción, separar los fragmentos de ADN resultantes, identificar la secuencia de bases de cada fragmento y unir las secuencias y así deducir la estructura completa del ADN clonado.

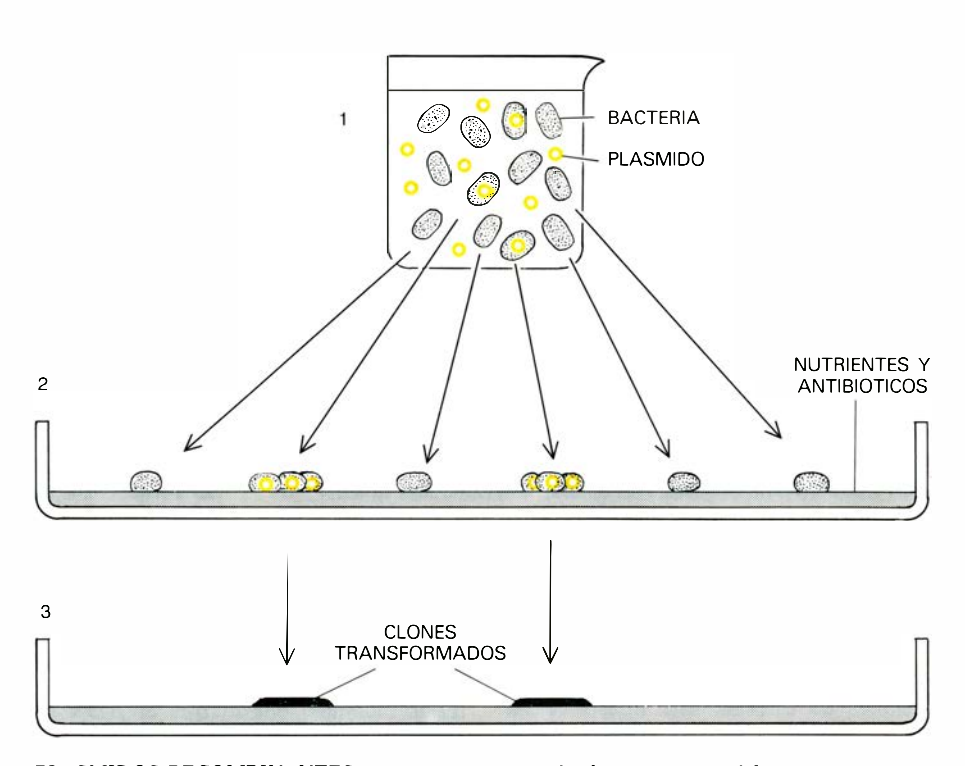
Existen dos métodos para conocer la secuencia del ADN. Ambos se fundan en la utilización de puntos de referencia creados por la ruptura del ADN por enzimas de restricción en una corta secuencia específica, y, a partir de ella, en el estudio del resto de la secuencia mi-

diendo la distancia entre cada base y el corte. Esto se lleva a cabo creando un conjunto de moléculas marcadas radiactivamente, cada una de las cuales se extiende desde el punto común hasta el lugar donde existe una base específica. Cuando estas moléculas se separan en razón del tamaño y se detectan por su radiactividad, la longitud de la más pequeña muestra la posición en la que aparece esa base en primer lugar; las moléculas más largas corresponden a posiciones posteriores de esas bases. El patrón establecido por el análisis de estas moléculas se asemeja a una escalera. A partir de la posición de los peldaños podemos determinar las longitudes. Comparando cuatro de estos patrones se llega a reconocer una secuencia de bases.

En la técnica diseñada por Allan M. Maxam y uno de nosotros (Gilbert) se utilizan reactivos químicos que detectan las diferentes propiedades químicas de las bases y rompen el ADN por ellas. Para generar el conjunto de fragmentos las reacciones se llevan a cabo durante un tiempo corto, de forma que la molécula de ADN se rompa en algunos puntos, no en todos los que se presenten dichas bases; distintas moléculas se romperán en puntos diferentes. Se emplean cuatro conjuntos diferentes de reactivos para crear los cuatro patrones. El marcaje radiactivo se une directamente al extremo del fragmento de restricción concreto que se desea secuenciar, y así sólo se detectan, por su radiactividad, aquellas moléculas que se extienden desde el extremo marcado hasta el corte.

El otro método de secuenciación del ADN, puesto a punto por Frederick Sanger, de los Laboratorios de Biología Molecular del Consejo Británico de Investigación Médica en Cambridge, obtiene una copia de ADN con un enzima y suspende la síntesis secuencial, y, en consecuencia, la elongación de la copia, mediante bloqueo del movimiento del enzima en una base específica. En este caso, el marcaje radiactivo se incorpora en la molécula recién sintetizada en cuatro reacciones diferentes. Ambos métodos pueden proporcionar la secuencia de 200 a 300 bases en un solo experimento. Uno de los pequeños plásmidos utilizados en nuestros experimentos de clonaje fue secuenciado en un año por Gregory Sutcliffe, que desentrañó el orden de 4357 bases sobre una cadena del ADN y lo comprobó determinando la secuencia de la cadena complementaria.

Cualquier región de ADN presente en un plásmido puede aislarse y secuenciarse. La dificultad no estriba en determinar la secuencia, sino en obtener el fragmento específico de ADN que se necesita. La técnica de recombinación de ADN sirve casi como un microscopio para aislar y aumentar una región de ADN, haciendo muchas copias; pero nadie desea buscar entre un millón de bacterias para encontrar un gen especifico. El problema fundamental, que carece de solución general, es insertar en una bacteria únicamente la secuencia de ADN deseada, el gen estructural deseado.



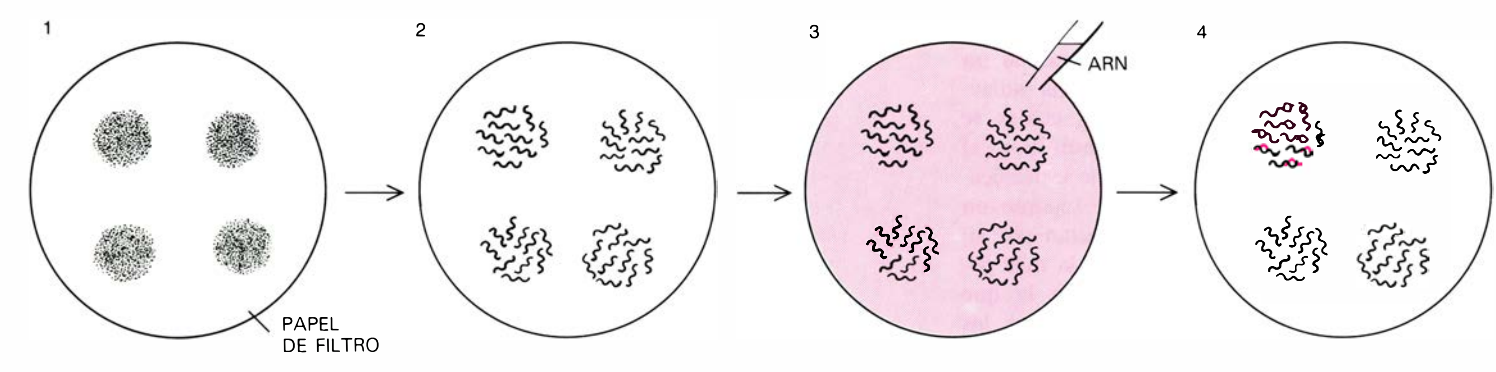
PLASMIDOS RECOMBINANTES, que contienen insertados los genes que codifican para proteínas animales, y genes para resistencia a tetraciclina se mezclan con las bacterias (*1*). Algunas células incorporan el plásmido. Las células se extienden sobre un cultivo con el antibiótico (*2*), que mata las células que carecen del plásmido. Las células que han tomado el plásmido son resistentes al antibiótico, y sobreviven. Cada una de ellas da lugar a un clon, una colonia de células genéticamente idénticas (*3*).

Obtención del gen correcto

Para proteínas muy pequeñas, resulta idóneo un planteamiento directo. La secuencia de aminoácidos y el código genético predicirán la secuencia de bases que puede especificar dichos aminoácidos. Cabe entonces sintetizar químicamente una molécula correspondiente de ADN. Y eso es lo que hicieron Keiichi Itakura y sus colaboradores en el Centro Médico Nacional "Ciudad de la Esperanza" en Duarte (California), quienes construyeron una secuencia de 42 bases de longitud que codificaba la estructura de la somatostatina, una pequeña hormona que consta de 14 aminoácidos. Sin embargo, cuanto más largo es el fragmento de ADN, más cuesta su construcción; la síntesis de un fragmento de 100 bases es extremadamente difícil. Muchas hormonas pequeñas contienen entre 50 y 100 aminoácidos; los enzimas y otras proteínas comprenden desde 200 a varios miles de aminoácidos de longitud. Por si fuera poco, se desconoce la secuencia de aminoácidos de muchas proteínas de interés. (De hecho, sólo se ha podido determinar la secuencia de aminoácidos de algunas de estas proteínas a través de la secuenciación de ADN clonado.)

El gen estructural deseado se halla, obviamente, en algún lugar del ADN de la célula animal. El problema consiste en encontrarlo; aun cuando esto fuera posible, la información estructural estaría dividida (como hemos mencionado antes) por largos fragmentos de otro ADN. En el ARN mensajero, sin embargo, la información se presenta sin solución de continuidad. Células distintas se especializan, además, en la síntesis de diferentes proteínas, de forma que los tejidos correspondientes contendrán el ARN mensajero junto con otros ARN mensajeros para las proteínas comunes fabricadas por todas las células. La insulina, por ejemplo, es fabricada por las células beta del páncreas; estas células contienen ARN mensajero para insulina, no así otras células, por más que el gen que codifica la insulina se halle en el ADN de todas las células.

Se trata entonces de convertir la información estructural deseada del ARN mensajero de la célula en ADN, que puede clonarse. A ese objeto nos valemos de la existencia de un enzima especial, la transcriptasa inversa, que copia una cadena sencilla de ARN en una cadena complementaria de ADN. (El enzima se encuentra en ciertos virus de



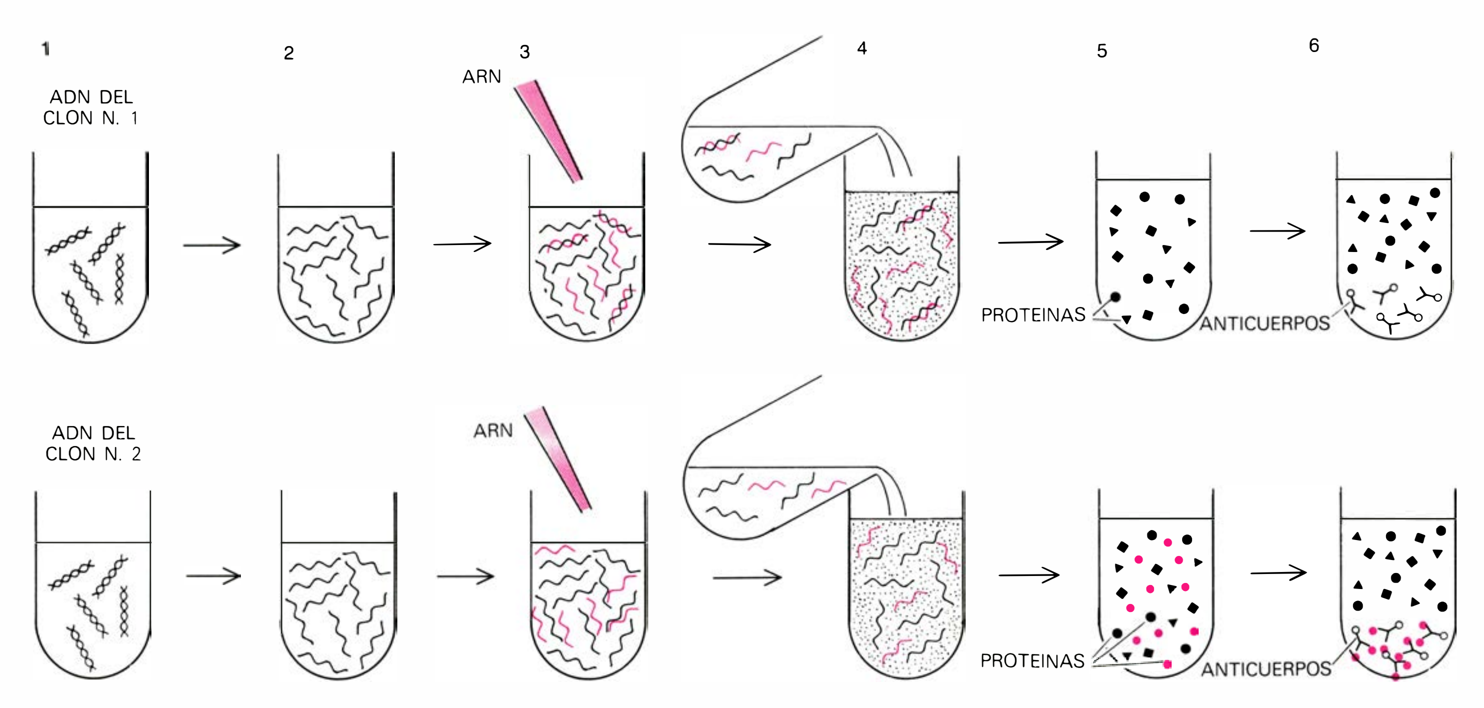
CLONES PORTADORES del ADN deseado. Podemos hallarlos entre todos los clones transformados con éxito (*1*) por medio de la hibridación entre ADN y ARN, si se posee una muestra de ARN mensajero puro para la secuencia deseada. Se rompen las células, se desnaturaliza su ADN y se fija a un papel de filtro (*2*). Se añade la muestra de ARN (moléculas de ARN marcadas con un isótopo radiactivo) (*3*). El ARN se apareará con cualquier ADN cuya secuencia sea complementaria, formando híbridos ADN-ARN (*4*); el resto se elimina por lavado. La presencia de los híbridos

ARN, que invierten la transcripción normal de ADN en ARN. Para transferir su información de una célula a otra, y convertir el ARN de nuevo en ADN con la ayuda de la transcriptasa inversa después de infectar una nueva célula, esos virus dependen de ARN y no de ADN.) A partir de esta cadena de ADN complementaria, denominada "ADN-copia" (ADNc), podemos obtener una segunda cadena de ADN con los enzimas normales que copian el ADN. Los fragmentos resultantes de ADNc bicatenario son copias más o menos completas, no solamente del ARN mensajero deseado, sino también de todos los demás ARN mensajeros que estuvieran presentes en el tejido. No obstante, y en el mejor de los casos, tan sólo unos cuantos fragmentos de ADN contienen toda la información estructural deseada. En estos fragmentos, las señales reguladoras que rodean las secuencias estructurales corresponden a la traducción en las células animales, pero no en las bacterias; además, puesto que el ADN se formó a partir del ARN, no existirán señales para la transcripción. Aunque podemos clonar el ADNc persisten todavía dos problemas: detectar los clones que contienen los fragmentos de ADN estructural deseado y añadir las señales reguladoras apropiadas.

Identificación del clon adecuado

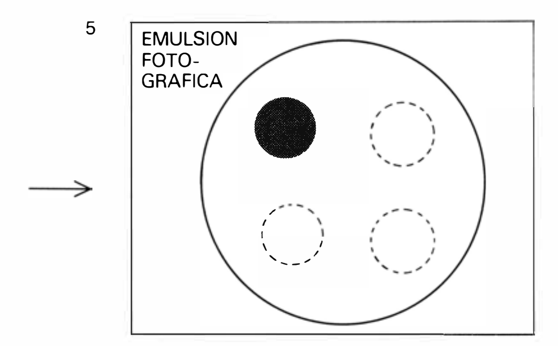
Si el experimento parte de un ARN mensajero puro, resulta fácil dar con el clon deseado. Pueden detectarse secuencias complementarias por el procedimiento denominado hibridación. Se separan las dos cadenas del ADN por calentamiento, que rompe los enlaces débiles que mantienen juntas las dos cadenas sin quebrar los enlaces fuertes entre las bases a lo largo de la cadena. Al enfriarse una mezcla de dichas cadenas, se manifestarán las secuencias complementarias. La primera etapa de este proceso se denomina desnaturalización; la segunda, reapareamiento. El mismo proceso sirve para identificar secuencias complementarias entre ARN y ADN.

Se cultivan las colonias bacterianas sobre discos de papel de nitrato de celulosa, se rompen in situ las células y el ADN que se libera queda fijado al papel. Una vez se haya el ADN desnaturalizado y apareado de nuevo con ARN radiactivo, sólo mostrarán radiactividad



BLOQUEO DE LA TRADUCCION por hibridación, técnica desarrollada por Bryan Roberts. Mediante ella se identifica un clon (*parte superior*) que contiene el ADN deseado incluso en ausencia de una muestra de ARN purificado. El ADN de los clones sometidos a comprobación (*1*) se desnaturaliza (*2*). Se añade ARN no purificado (el mismo ARN utilizado para obtener el ADN insertado) (*3*); este ARN se apareará con cualquier ADN complementario. Colocado en un sistema de traducción, en el que haya aminoácidos marcados radiactivamente (*4*), el ARN no hibridado dirigirá la síntesis de proteínas radiactivas, pero el ARN hibridado no podrá traducirse; la proteína específica codificada por el ADN deseado no se sintetizará si el clon contiene el ADN buscado (*5*). La presencia de la proteína se determina por un ensayo con anticuerpos. Se añaden anticuerpos específi-

5



se revela por autorradiografía: se coloca una emulsión fotográfica sobre un filtro y, después de la exposición, los clones que contienen el ADN deseado se identifican por manchas oscuras (*5*).

los restos de aquellas colonias que contengan un plásmido cuya secuencia sea complementaria al ARN mensajero. Puesto que se conserva una réplica (un conjunto duplicado de colonias viables), puede obtenerse la bacteria que incorpore el ADN deseado. Estas bacterias se cultivan con el fin de conseguir suficiente material para identificar, en sucesivos experimentos de hibridación, otros clones que contengan la misma secuencia en diferentes zonas del ADN y sean quizá más eficaces en la producción de la proteína deseada.

Cuando no se pueda purificar el ARN mensajero, porque el mensajero específico constituya una pequeña fracción de todos los ARN mensajeros de la célula, existen otros procedimientos para buscar la secuencia de ADN deseada. Una propiedad útil es el contorno detallado de la proteína final perseguida. Las configuraciones más características y distintivas pueden reconocerlas las moléculas proteicas denominadas anticuerpos. Los animales producen anticuerpos como parte de su sistema de protección frente a substancias extrañas. Si se inyecta insulina humana en un cobayo, por ejemplo, éste producirá anticuerpos capaces de unirse a la insulina humana. Estos anticuerpos no se unirán a la insulina propia del cobayo, ya que solamente "ven" las configuraciones que hace diferente a la proteína humana. Un anticuerpo purificado puede, por tanto, servir de reactivo para detectar una proteína determinada. (En ello se funda el funcionamiento de las vacunas. Si inyectamos en un animal un virus inactivado, se le estimula a fabricar anticuerpos contra las proteínas virales. Posteriormente, los anticuerpos protegerán al animal contra la infección por ese virus uniéndose a las partículas de virus y emitiendo señales a otras células, a fin de que eliminen el virus invasor. Sin la estimulación inicial, la respuesta de los anticuerpos al virus resulta demasiado lenta para bloquear la infección.)

Incluso sin purificar un ARN mensajero específico, podemos conseguir que las moléculas de ARN actúen en el tubo de ensayo, mediante la adición de aminoácidos radiactivos y la maquinaria necesaria para traducir los mensajeros (obtenida a partir del citoplasma de células rotas). De entre las pequeñas cantidades de proteínas radiactivas que se sintetizan, se puede reconocer, utilizando anticuerpos, la proteína que nos interesa. Lo que constituye un medio de detectar la presencia de un mensajero específico. Si se toma un plásmido recombinante y se hibridiza con la mezcla de los ARN, solamente el ARN que tenga secuencias complementarias a las del plásmido se apareará con él, y por tanto será incapaz de funcionar en la traducción; el plásmido de interés puede detectarse por su capacidad de bloquear la síntesis de la proteína deseada. Tal identificación es verificable, pues el ARN unido al ADN puede separarse de todos los demás ARN y liberarse posteriormente del ADN; a partir de entonces, podrá volver a dirigir la síntesis de la proteína.

7

8

cos para la proteína (fijados a partículas de plástico), que se unirán a la proteína, precipitándola en la solución (*6*), de la que, por decantación (*7*), se separan. La determinación de la radiactividad del precipitado (*8*) muestra que un clon contiene el ADN deseado, pues bloquea la síntesis proteica.

Señales reguladoras

El recurso a estas técnicas permite clonar e identificar fragmentos de ADN que contienen la información que codifica para la estructura de una proteína. Ahora bien, ¿funcionará esta información en bacterias?

Para ello hemos de proporcionar las señales reguladoras que la bacteria sepa utilizar. Una de ellas es la señal de inicio de la síntesis de un ARN mensajero. En las bacterias se trata de una región de ADN situada inmediatamente delante del segmento de ADN que será transcrito en ARN. La segunda señal importante corresponde a una parte del ARN mensajero, que indica a la maquinaria de traducción de la bacteria el punto de iniciación ("comenzar aquí"). Todos los genes bacterianos poseen ambas clases de señales de iniciación (si bien algunas funcionan mejor que otras). Portan asimismo dos señales de terminación, una para la traducción y otra para la transcripción. Una forma sencilla de producir la secuencia de la nueva proteína es cortar un gen bacteriano por la mitad, utilizando un enzima de restricción, e insertar allí el nuevo ADN. El proceso origina una proteína híbrida que comienza como una proteína bacteriana y continúa con la cadena de aminoácidos que se desea. Así fue como el gen para la somatostatina, sintetizando químicamente, se logró traducir en bacterias. El ADN para esos 14 aminoácidos, seguido por una señal de terminación, se insertó cerca del extremo final de una proteína de 1000 aminoácidos. Una vez que la bacteria sintetizó la proteína híbrida, el segmento correspondiente a la somatostatina se separó por medios químicos y se purificó.

Además de aportar las señales reguladoras, los genes bacterianos pueden proporcionar propiedades útiles a la proteína híbrida. Así ciertas proteínas bacterianas son excretadas a través de la membrana que rodea la célula. Si se inserta el ADN de origen animal dentro del gen que codifica para tales proteínas, la parte bacteriana de la proteína híbrida actuará de portador que acarreará la nueva proteína a través de la membrana. Resulta así mucho más fácil observar y purificar la proteína.

Nos hemos servido de todas las técnicas anteriormente descritas en la obtención de una copia del gen que codifica para la insulina y su inserción en bacterias con el propósito de conseguir proinsulina. La insulina es una pequeña hormona constituida por dos cadenas cortas, una de 20 y otra de 30 aminoácidos. En un comienzo, estas dos cadenas formaban parte de una cadena más larga, de 109 aminoácidos, denominada preproinsulina. Cuando se sintetiza preproinsulina en las células beta del páncreas, los primeros 23 aminoácidos de la cadena actúan como una señal que dirige el paso de la molécula a través de la membrana celular. Durante el proceso, estos aminoácidos se eliminan, restando

una cadena de 86 aminoácidos: la proinsulina. La cadena de proinsulina se pliega de forma que queden juntos el primero y el último fragmento de la cadena, y la porción central se corta enzimáticamente a fin de producir insulina. La región central tiene por misión alinear correctamente las dos cadenas que constituyen la insulina. Y si luego separamos ambas cadenas, no resulta fácil su reagrupamiento o pierden eficacia. (A pesar de esos inconvenientes, Itakura y sus colaboradores sintetizaron dos fragmentos de ADN correspondientes a las dos cadenas de insulina humana y los unieron por separado, como en el caso de la somatostatina, a un mismo gen bacteriano de gran tamaño, a fin de sintetizar dos proteínas híbridas en dos bacterias diferentes. Cortaron luego las dos piezas, las purificaron y las ensamblaron par formar insulina.)

Partimos, en nuestros experimentos, de un tumor de células beta de rata, productoras de insulina. (Trabajamos con insulina de rata porque en los años en que comenzamos nuestros ensayos las normas establecidas por los Institutos Nacionales de la Salud para investigaciones sobre recombinación de ADN prohibían insertar el gen que codifica para la insulina humana en bacterias; la prohibición se revocó más tarde.)

Experimento de la proinsulina

Hicimos copias de ADN a partir del ARN mensajero de las células beta. Las insertamos en un plásmido, en mitad del gen que codifica para la proteína bacteriana penicilinasa, enzima que se excreta a través de la membrana celular. Buscamos, por hibridación, entre las colonias bacterianas; comprobamos que teníamos el plásmido híbrido adecuado al bloquear la síntesis de insulina en un tubo de ensayo tal como hemos descrito más arriba; secuenciamos, por último, el ADN para ver exactamente qué parte del gen para la insulina teníamos. Una vez obtenido un plásmido híbrido, lo utilizábamos para encontrar 48 plásmidos más, repitiendo los experimentos de hibridación. Estos 48 clones representaban el dos por ciento de todos los clones que habíamos conseguido.

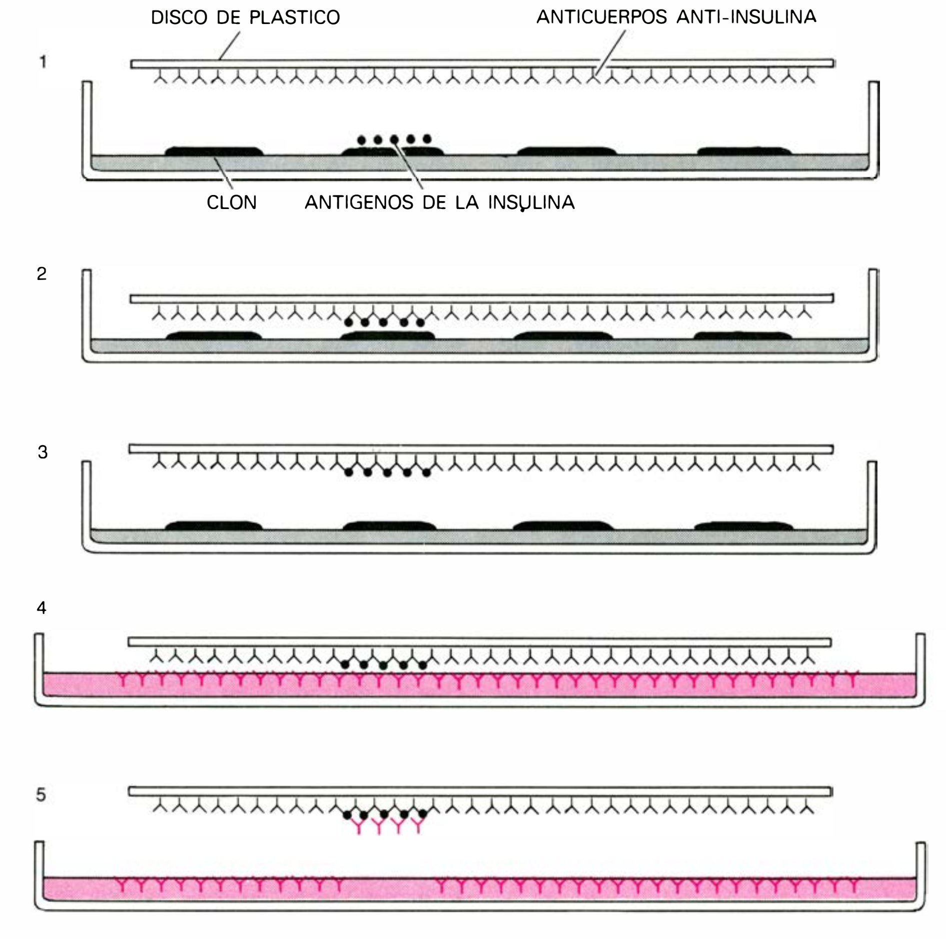
¿Serviría alguno de estos clones para sintetizar realmente insulina? Entre los clones que contenían ADN específico para insulina, buscamos uno que produjera una proteína híbrida, una de cuyas partes fuera proinsulina. Para conseguirlo utilizamos una prueba muy sensible de radio-inmunoensayo. Recubrimos discos de plástico con anticuerpo dirigido contra insulina o contra penicilinasa y los expusimos al contenido de las células de cada clon. La insulina (o penicilinasa) que hubiera en las células debería unirse al anticuerpo, quedando por consiguiente fijada al disco de plástico. A continuación aplicamos marcaje con anticuerpo anti-insulina radiactivo para detectar la presencia de proteínas que ostentaran la configuración de la insulina. Un clon dio respuesta positiva a anticuerpos radiactivos anti-insulina, tanto en discos recubiertos con anti-insulina como en los recubiertos con anti-penicilinasa, demostrándose de esta forma la presencia de una proteína híbrida penicilinasa-insulina.

Por ver si la bacteria segregaba la proteína híbrida, cultivamos el clon en líquido y nos dispusimos a extraer la proteína por un método que no rompiera la membrana celular. La prueba demostró que la proteína híbrida estaba presente en el exterior de la membrana: tal y como nosotros habíamos esperado, se segregaba.

La secuenciación del ADN demostró que los fragmentos de ADN y los pormenores de la fusión evidenciaban que en el clon existía información estructural solamente para la proinsulina y no para la región "pre". Con el propósito de producir insulina, eliminamos la mayor parte de la proteína bacteriana y el segmento intermedio de la proinsulina, con el enzima digestivo tripsina. ¿Sería activa la insulina producida por la bacteria? Stephen P. Naber y William L. Chick, de los Laboratorios de Investigación Elliot P. Joslin de Boston, sometieron la molécula a experimentación, probando que afectaba el metabolismo de los azúcares en las células adiposas, tal como debía ser.

Optimización del rendimiento

La cantidad de proinsulina producida por el clon original era muy pequeña. Hoy estamos empeñados en varias manipulaciones que mejoren el rendimiento. Las señales reguladoras no sólo deben ser eficientes, sino que, además, han de estar localizadas en la posición

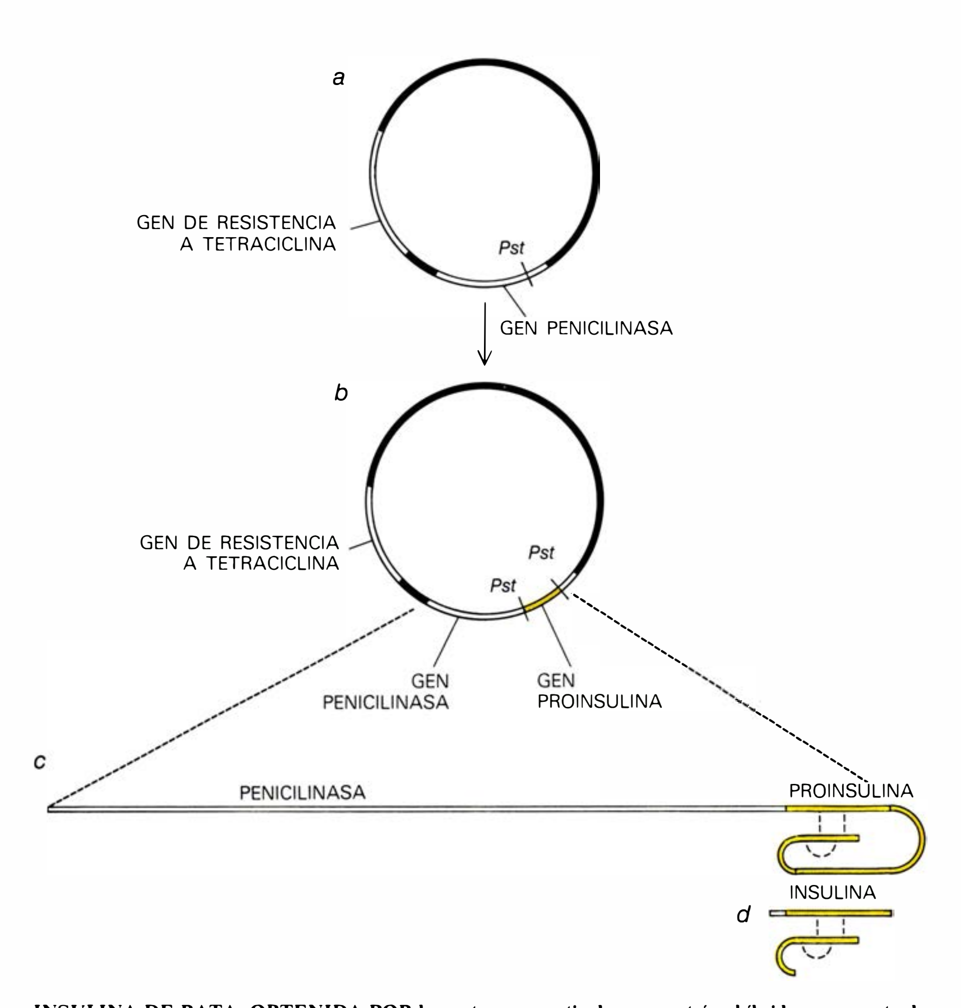


ENSAYO CON ANTICUERPOS RADIACTIVOS, desarrollado por Stephanie Broome y uno de los autores (Gilbert). Se recurre a él para localizar entre los clones bacterianos con ADN que codifican para insulina, signos de que efectivamente se está sintetizando esa hormona. Un disco de plástico recubierto con un anticuerpo anti-insulina se expone en primer lugar al contenido de las células de cada clon (*1*). Cualquier insulina presente en las células se unirá al anticuerpo (*2*) y quedará por consiguiente fijada al disco de plástico (*3*). Se aplican entonces anticuerpos anti-insulina marcados radiactivamente (*en color*) al disco, para detectar la presencia de la proteína (*4,5*). Cuando la prueba se repite con un disco de plástico recubierto con un anticuerpo antipenicilinasa, solamente una proteína híbrida, formada en parte por penicilinasa y en parte también por insulina, se unirá el anticuerpo marcado.

óptima. No hay por qué sentirse satisfecho con las señales localizadas en el contorno de genes bacterianos preexistentes. Utilizando enzimas de restricción es posible cortar pequeños fragmentos de ADN que contengan sólo las señales reguladoras y unirlos con enzimas capaces de ligar ADN, a fin de conseguir nuevas combinaciones. Es posible recortar de nuevo los extremos de estos fragmentos eliminando bases con otros enzimas específicos antes de volverlos a conectar. De esta forma, se alteran las distancias entre las señales y las secuencias que codifican para la estructura. Aunque cada una de estas manipulaciones genera un número de moléculas correctas pequeño, se pueden conseguir, a través de experimentos de clonaje después de cada etapa, grandes cantidades de ADN y estudiar la secuencia del mismo antes de continuar la manipulación.

Además, podemos sintetizar cortas secuencias del ADN deseado y unirlas a otros fragmentos. En este sentido, David V. Goeddel y sus colaboradores, en Genentech, Inc., tomaron un fragmento de ADN que portaba la información estructural para la hormona humana del crecimiento (168 aminoácidos), la conectaron a un fragmento sintético de ADN que contenía parte de la señal de iniciación de la traducción y unieron el conjunto a un fragmento que incluía el resto de las señales reguladoras. Cuando este ADN fue clonado, la bacteria produjo una proteína con la configuración (según se ha reconocido mediante anticuerpos) y el tamaño de la hormona del crecimiento (aun cuando hasta el presente no se ha demostrado su actividad biológica).

Pese a que todavía no conocemos la combinación óptima de los elementos de ADN para producir insulina en bacterias, encontrarla es cuestión de tiempo. Hay, sin embargo, otros problemas que merecen nuestra atención. Con frecuencia, las nuevas proteínas animales se degradan en el interior de la célula bacteriana, pues algunos enzimas normalmente presentes en la célula bacteriana puede digerir su estructura. Hay que encontrar la forma de estabilizar las proteínas, ya sea por eliminación de estos enzimas proteolíticos, ya sea por inclusión de la nueva proteína en otra proteína híbrida que la proteja, ya sea, por último, logrando la excreción de la proteína de la célula. Las propias moléculas de ARN mensajero suelen mostrarse inestables dentro de la célula; se requieren modificaciones en su estructura y en la de la propia célula que las hagan más eficaces y conduzcan a un aumento en la síntesis de la proteína deseada. Asimismo, si se aumenta el número de co-



INSULINA DE RATA, OBTENIDA POR los autores a partir de una proteína híbrida, compuesta de parte de la molécula de penicilinasa bacteriana y de una molécula de proinsulina, que es un precursor de la insulina. El mapa del plásmido que sirvió como vehículo, *pBR*322 (*a*), muestra la localización de los genes que codifican para los dos enzimas que confieren resistencia a antibióticos y el punto de escisión para el enzima de restricción *Pst*. El mapa siguiente (*b*) muestra la estructura, determinada por la secuenciación del ADN, del plásmido recombinante en el clon bacteriano que sintetizó proinsulina. La secuencia de proinsulina (*en color*) se encuentra entre dos puntos para *Pst*, que fueron regenerados en el proceso de inserción. La proteína híbrida sintetizada por el clon (*c*) comprende la mayor parte del enzima penicilinasa y también la molécula de proinsulina (*en color*); las líneas discontinuas representan enlaces disulfuro. Los autores eliminaron la mayor parte del enzima penicilinasa y el segmento central de la proinsulina (*que aparece en color claro*) para formar hormona insulina biológicamente activa (*d*).

pias en cada célula del plásmido que contiene el gen, se elevará la cantidad de producto fabricado.

A la vez que trabajamos para aumentar la producción de proinsulina de rata y su purificación, esperamos aplicar los mismos métodos a la síntesis bacteriana de insulina humana. Investigadores de otros laboratorios están también empeñados en el mismo problema; cabe suponer que, en el futuro, la producción de insulina humana por bacterias sea más barata que la purificación de insulina a partir de cerdos y ganado vacuno, fuente de la que se obtiene actualmente la hormona. Ni que decir tiene que otras hormonas humanas podrán también obtenerse por estos procedimientos. ¿Qué otras proteínas con utilidad terapéutica podrían producir las bacterias? En general, cualquier proteína humana que no pueda obtenerse de forma rentable a partir de animales dispone de excelentes perspectivas.

Muchas enfermedades genéticas se deben a la ausencia de una única proteína. La producción de esta proteína en bacterias haría viable una terapia de reemplazamiento. Las vacunas contra infecciones víricas o parasitarias abren un nuevo campo de posibilidades. Actualmente, para producir una vacuna es necesario cultivar los organismos causantes de la enfermedad en grandes cantidades; con frecuencia, esto es imposible o peligroso. Además, la vacuna debe hacerse inofensiva antes de su administración, lo que puede resultar bastante difícil. La nueva tecnología ofrece la posibilidad de producir, en bacterias, únicamente aquella proteína contra la que debe encaminarse la respuesta del anticuerpo. Esto eliminaría la necesidad de trabajar con el organismo patógeno intacto. Por ejemplo, el virus *B* de la hepatitis, que causa la hepatitis del suero, no puede cultivarse fuera del cuerpo. La única fuente de este pequeño virus de

ADN es la sangre de seres humanos infectados. El ADN de este virus, clonado ya en varios laboratorios, permitirá que se desentrañe su secuencia completa y quede desvelada así la estructura de las proteínas víricas. Hoy las proteínas se están produciendo en bacterias. Este trabajo ha proporcionado gran cantidad de nueva información.

Otras proteínas de síntesis bacteriana

Un candidato especialmente prometedor constituye el interferón. Se trata de una proteína producida por las células para bloquear rápidamente las infecciones virales. (La respuesta de los anticuerpos es mucho más lenta.) El interferón parece ser la vanguardia de la defensa corporal contra los virus. También puede tener efectos terapéuticos en ciertas formas de cáncer. Pero nunca se ha conseguido en cantidades suficientemente grandes para determinar su grado de eficacia en la protección contra las enfermedades. La posibilidad de probar la actividad del interferón humano será pronto una realidad, ya que la proteína se ha producido recientemente en bacterias. Weissman, con sus colaboradores Shigekazu, Nagata, Hideharu Taira, Alan Hall, Lorraine Johnsrud, Michel Streuli, Josef Ecsödi y Werner Boll, junto con Kari Cantell, de la Cruz Roja Finlandesa, aplicaron muchas de las técnicas antes descritas para clonar y expresar esta proteína. Se les planteó el problema de que el ARN mensajero para el interferón era mucho más raro que el de la insulina, incluso en glóbulos blancos estimulados para producir interferón por infección con un virus. Tomaron el ARN mensajero de estas células sanguíneas (17 litros cada vez), produjeron ADNc bicatenario y lo clonaron por el procedimiento descrito más arriba.

Revisaron unos 20.000 clones (en lotes), hibridando el ADN plasmídico de los clones con el ARN mensajero de los glóbulos blancos de la sangre, aislaron el ARN que se apareaba y comprobaron si el ARN era capaz de dirigir la síntesis de interferón (no en tubo de ensayo, sino inyectando el ARN directamente en una célula especialmente grande: el huevo de rana). Afortunadamente, el interferón es una sustancia extremadamente potente, de manera que la cantidad sintetizada en el huevo de rana pudo detectarse por su capacidad de proteger las células frente a los virus.

Una vez que Weissman y sus colaboradores encontraron un conjunto de clones que podían hibridar con el ARN mensajero para el interferón, ensayaron sucesivamente con grupos cada vez menores de estos clones hasta dar con el adecuado. Posteriormente, tomando este clon por control, hallaron otros clones mediante pruebas de hibridación. Por último, probaron directamente extractos de la bacteria que llevaba el ADN para el interferón (insertado dentro del gen para la penicilinasa), a fin de demostrar si alguno de los clones producía interferón biológicamente activo. Cierto número de clones lo producían, confirmando así que la estructura del ADN del interferón había sido identificada correctamente. El estudio de la secuencia del ADN de estos clones permitirá determinar la estructura del interferón, todavía por conocer.

La cantidad de interferón producida en bacterias resultó ser extremadamente pequeña. Tan sólo una o dos moléculas por célula. (Las proteínas bacterianas poseen generalmente entre 1000 y 100.000 copias por célula.) Confiamos que los métodos que hemos descrito logren resolver estos problemas y conduzcan a la producción de suficiente cantidad de interferón para realizar pruebas clínicas.

Debate sobre el ADN recombinante

El desarrollo de las técnicas de ingeniería genética descritas en este artículo se recibió a lo largo de la última década con una mezcla de entusiasmo y alarma. Los posibles beneficios de estas técnicas eran obvios, pero muchas personas veían en ellas motivos de preocupación. Los biólogos pidieron una evaluación de los posibles riesgos de esta investigación; los resultados fueron un esfuerzo nacional e internacional sin precedentes en el cual el público, los gobiernos y la comunidad científica se unieron para seguir de cerca el sesgo de las actividades científicas.

Un conocimiento más profundo sobre las propiedades de los genes y del comportamiento de las bacterias utilizadas en este trabajo (generalmente *Escherichia coli*) han llevado a una debilitación gradual de estos recelos y a un relajamiento de las normas que antes restringían tales experimentos. Visto en retrospectiva, con las ventajas del conocimiento actual, los recelos con respecto a hipotéticos riesgos no parecen haber estado justificados. No sabemos de ningún efecto adverso procedente de esta investigación. El gran potencial de las nuevas técnicas, para promover el crecimiento del conocimiento básico y para hacer posible la síntesis de productos que beneficien directamente a la sociedad, está mucho más cercano a su realización de lo que parecía hace escasos años.

Vidrios metálicos

Aunque por razón de su composición estos cuerpos sean metales, su estructura atómica no cristalina es característica de los vidrios. Se obtienen enfriando una aleación fundida a una velocidad del orden de un millón de grados por segundo

Praveen Chaudhari, Bill C. Giessen y David Turnbull

En cierto sentido, se puede considerar que un vidrio es la imagen fotográfica fija de un líquido. En general, cuando se solidifica un líquido, los átomos o moléculas quedan en reposo tan sólo después de haber alcanzado ciertas posiciones ordenadas propias de una estructura cristalina. En consecuencia, la configuración de los átomos en el sólido es muy diferente de la del líquido; durante el proceso de solidificación se produce una importante reordenación de dichos átomos. Por otra parte, en la formación de un vidrio, los átomos del líquido se detienen en el curso de sus trayectorias. En un vidrio no sólo se congela el propio material sino la misma configuración de los átomos. Contrariamente a lo que sucede en un sólido cristalino, el vidrio no presenta ordenación de largo alcance; se trata de un material amorfo.

Los vidrios que nos resultan más familiares son silicatos, es decir, sustancias compuestas de silicio y oxígeno. Durante mucho tiempo se creyó que la mayoría de las otras sustancias, y especialmente los metales, no se podrían solidificar en estado vítreo, sino que al enfriarse adoptarían invariablemente una forma cristalina. Actualmente, hay abundantes pruebas de lo contrario: de hecho, se han preparado docenas de aleaciones metálicas en forma de vidrios. A primera vista, su parecido con un vidrio corriente es pequeño; por ejemplo, la mayoría de ellos no son frágiles y, además, son opacos a la luz visible. Sin embargo, su estructura microscópica es idéntica a la que poseen los materiales amorfos. Para distancias algo mayores que la de las distancias interatómicas, no se observa ningún tipo de regularidad o periodicidad en las posiciones de los átomos. La determinación de cuál es la mejor forma de describir esta estructura microscópica constituye uno de los campos de investigación más activos que existe en relación con el estudio de estos materiales.

Los vidrios metálicos difieren tanto de los vidrios silíceos como de los metales cristalinos. Algunas de las aleaciones vítreas presentan ciertas propiedades mecánicas y químicas peculiares, tales como su resistencia a la corrosión o su gran flexibilidad y ductilidad. También resultan interesantes sus propiedades eléctricas y magnéticas que sugieren ya ciertas aplicaciones concretas. Por ejemplo, algunas de las aleaciones podrían constituir un medio adecuado para producir "burbujas" magnéticas o dominios aislados de magnetización inversa que se pueden utilizar para almacenar información en el sistema de memoria de un ordenador. Otra posible aplicación consiste en la fabricación de núcleos magnéticos de los transformadores eléctricos que actualmente se construyen a base de hierro dulce en fase cristalina. El empleo de un vidrio metálico permitiría reducir las pérdidas de energía que se producen por la inversión continua del campo magnético en dichos núcleos.

La experiencia ha demostrado que para cualquier material sólido existe siempre al menos una fase cristalina que es más estable que el estado amorfo. En otras palabras, la forma cristalina resulta favorecida termodinámicamente (se dice que su energía libre es menor) y, en consecuencia, cualquier vidrio tiende a cristalizar de modo espontáneo. Ello es cierto incluso para los vidrios silíceos, aunque, a temperaturas ambientes, su velocidad de cristalización viene a ser nula. Los vidrios silíceos cristalizan tan despacio debido a que sus átomos están interconectados por una red de enlaces químicos covalentes, cada uno de los cuales une dos átomos diferentes. Para que los átomos puedan ordenarse formando una estructura cristalina es necesario que se rompan muchos de dichos enlaces y que los átomos se reorganicen formando otra configuración diferente. De aquí que, aun cuando la energía libre del cristal fuera menor en última instancia que la del vidrio, para llevar a cabo dicha transición sería necesario aportar una cantidad sustancial de energía.

El enlace químico de los átomos en un metal es más difuso que en los silicatos o en otros materiales aislantes similares. Los enlaces individuales no están dirigidos fuertemente de un átomo a otro; en su lugar, el sólido debe su coherencia a la interacción mutua entre un gran número de iones cargados positivamente y electrones, cargados negativamente. Como resultado de la naturaleza menos direccional del enlace de los metales, para reconstruir un cristal a partir de un vidrio metálico se necesitaría una cantidad menor de energía de activación. Por este motivo, las perspectivas de solidificación de metales en estado amorfo se consideraban remotas.

Para obtener un material en forma vítrea se precisa enfriarlo a una temperatura situada por debajo de cierto umbral, conocido como temperatura de vitrificación, cuyo valor varía de una sustancia a otra. Por encima de la temperatura de vitrificación, en la fase líquida subenfriada, los átomos son libres de efectuar amplios movimientos de traslación; por debajo de dicha temperatura, los átomos quedan inmovilizados excepto para realizar movimientos de vibración alrededor de sus posiciones de equilibrio. La posición de los átomos queda fijada formando una estructura sólida amorfa únicamente al alcanzar la temperatura de vitrificación. En consecuencia, parece ser que la vía más directa de producir un vidrio consiste en enfriar un líquido por debajo de su temperatura de vitrificación.

Sin embargo, este procedimiento presenta la dificultad de que la temperatura de vitrificación de todas las sustancias conocidas es muy inferior al punto de congelación en el cual ya puede iniciarse la cristalización. Para ser más exactos, la temperatura de vitrificación es menor que la temperatura para la cual las fases

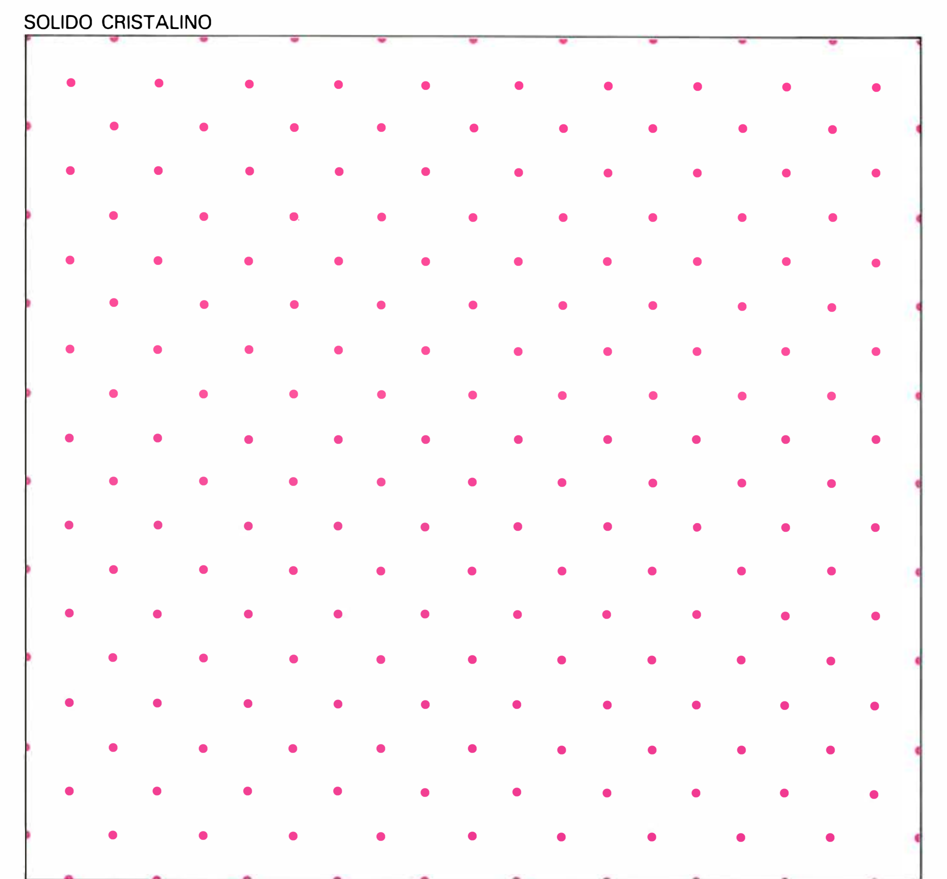
líquida y cristalina de un material están en equilibrio (temperatura de transición). Como resultado de este hecho, al enfriar un líquido se produce su cristalización mucho antes de que exista la posibilidad de que se forme un estado vítreo.

El principal método de preparación de vidrios metálicos resuelve este problema mediante una estrategia muy sencilla. Cuando se enfría un líquido por debajo de la temperatura de transición, la cristalización no se inicia al mismo tiempo en todos los lugares. Para constituir una configuración cristalina es necesario que se unan ciertos agregados constituidos por unos pocos átomos cada uno; estos agregados se denominan centros de nucleación. A continuación, se produce el crecimiento de dichos centros hasta que todo el volumen del material se solidifica. La formación y crecimiento de los centros de nucleación requiere el transcurso de cierto tiempo. El método de producción de un vidrio metálico se basa en enfriar rápidamente el líquido desde una temperatura mayor que la de transición hasta una temperatura inferior a la de vitrificación. Si el paso a través de la región intermedia es

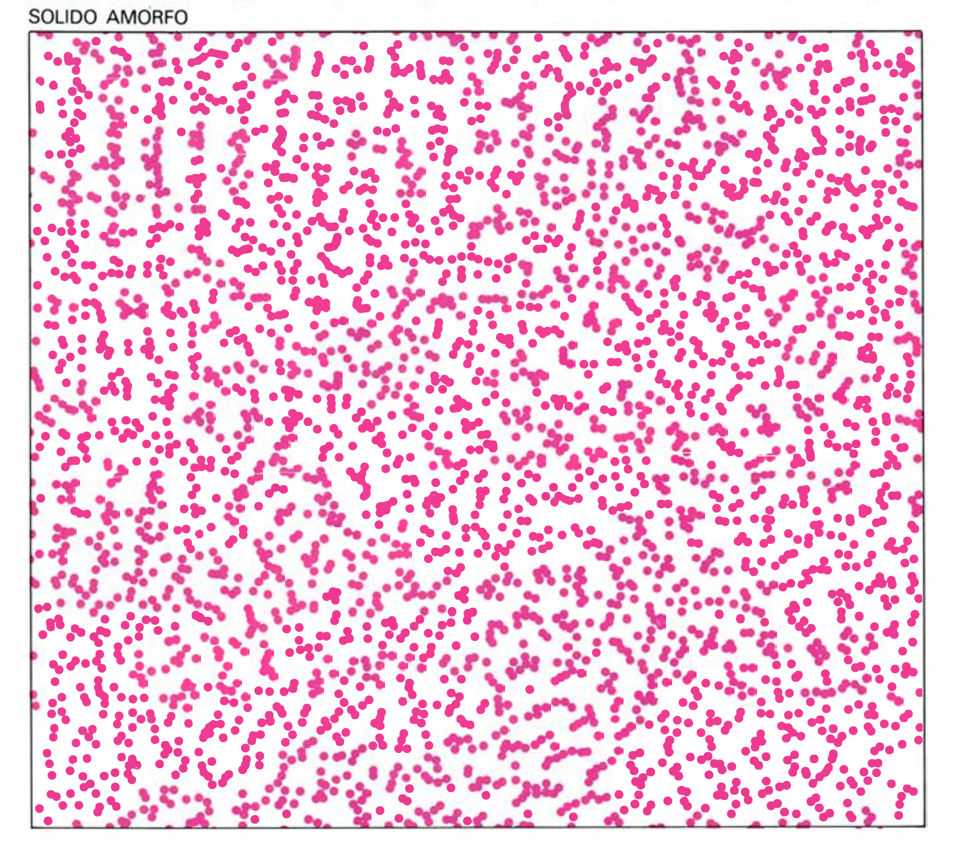


ENFRIAMIENTO RAPIDO de una aleación fundida, que da lugar a que el metal se solidifique en estado vítreo o amorfo. Una aleación de hierro contenida en un tubo de cuarzo se funde gracias a la acción de corrientes de radiofrecuencia inducidas por la bobina de la izquierda. En ese momento se aplica una presión y el metal fundido sale en forma de chorro a través de un pequeño orificio, llegando finalmente a la superficie de un cilindro de cobre que gira a razón de unas 3000 revoluciones por minuto. El metal se extiende formando una lámina cuyo espesor es del orden de algunas decenas de micrometro; esta lámina se solidifica en menos de un milisegundo y se desprende espontáneamente del rotor. La cinta de vidrio metálico que se produce en esta operación se puede ver en la presente figura en forma de una franja brillante; las chispas son pequeños fragmentos o gotitas de metal rechazados por el rotor. Esta fotografía ha sido realizada por Fritz Goro en el laboratorio de Chaudhari en el Centro Thomas J. Watson de la IBM.

SOLIDO CRISTALINO



SOLIDO AMORFO



DENSIDAD DE LOS SOLIDOS CRISTALINOS Y AMORFOS, o número medio de átomos por unidad de volumen; resulta ser muy similar, en unos y otros, aunque difieren en la forma en que se disponen los átomos que los constituyen. Las estructuras de los sólidos se representan aquí como la proyección de las posiciones de los átomos respectivos sobre un plano, como si los sólidos estuvieran iluminados por haces de rayos paralelos y sólo fuera visible su sombra. En el caso del cristal, la estructura es periódica para grandes distancias; conociendo las posiciones de unos pocos átomos, se pueden especificar las posiciones de todos los átomos presentes en el cristal. En el caso del sólido amorfo no existe una estructura periódica, aunque las posiciones de los átomos no se presentan distribuidas totalmente al azar. El orden en la disposición de los átomos se extiende tan sólo para distancias muy pequeñas. El conocimiento de las coordenadas de los átomos en una determinada región no nos ayuda a especificar las posiciones de los átomos distantes de esa región. (Ilustración de Allen Beechel.)

suficientemente rápido, no habrá tiempo para que se formen cristales.

La primera demostración inequívoca de que un metal se había transformado de un estado fundido a un estado vítreo fue llevada a cabo en 1960 por Pol Duwez, Ronald H. Willens y colaboradores en el Instituto de Tecnología de California. Su técnica de producción de vidrios metálicos estaba basada en un principio que todavía se utiliza en la actualidad, denominado laminación por rotación. Un chorro de metal fundido se dirige sobre la superficie de un disco o cilindro metálico en rotación, mantenido a temperatura ambiente o por debajo de ella. Como resultado de esta operación, el líquido forma una película cuyo espesor es del orden de algunas micras. El hecho de que la película sea tan delgada, de que se encuentre en contacto íntimo con un sumidero de calor cuyo volumen es relativamente grande y de que la conductividad térmica de los metales sea elevada, da lugar a que el metal se enfríe y solidifique con extraordinaria rapidez. En números redondos, el metal se puede llegar a enfriar unos 1000 grados Kelvin en un milisegundo, es decir, a razón de un millón de grados por segundo.

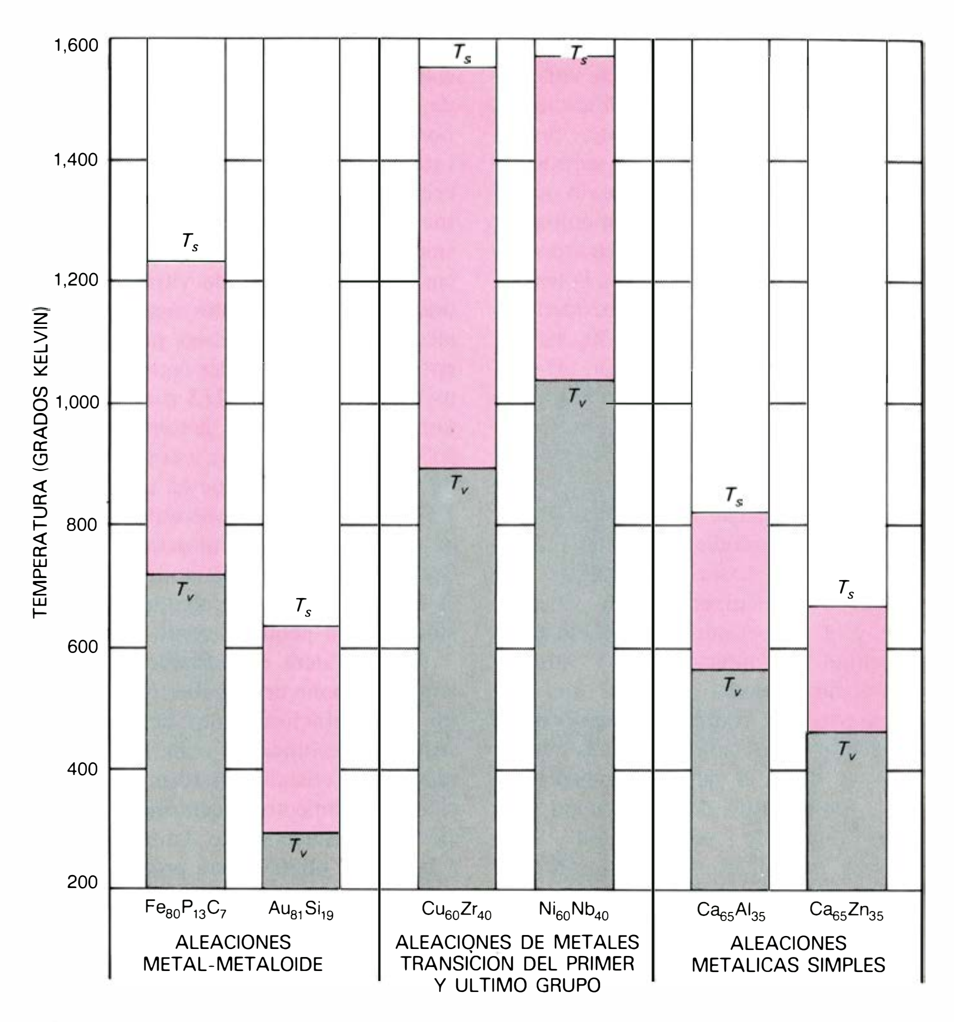
Mediante un enfriamiento tan extremadamente rápido, Duwez y sus colaboradores consiguieron solidificar una aleación de oro y silicio cuya composición era $Au_{81}Si_{19}$ en una forma tal que parecía ser amorfa. La investigación llevada a cabo con posterioridad estableció de modo concluyente el carácter no cristalino de dicho material. Este resultado estimuló enormemente la realización de otros trabajos en el campo de los metales vítreos; todas estas investigaciones han conducido al descubrimiento de otras muchas aleaciones susceptibles de ser preparadas en forma de estados vítreos siguiendo un procedimiento análogo al descrito anteriormente.

Los metales amorfos se pueden producir también utilizando otros métodos que no requieren que el metal fundido pase a través de la temperatura de transición líquido-sólido. Por ejemplo, se puede depositar una película amorfa sobre una superficie fría partiendo de una disolución de iones metálicos o del vapor de un metal. En realidad estas películas ya se habían obtenido con anterioridad al trabajo de Duwez, aunque su naturaleza amorfa no se había establecido con absoluta seguridad. Un sólido amorfo se puede preparar también irradiando un metal cristalino con partículas de alta energía; estas partículas producen la ruptura de las redes atómicas.

En algunas ocasiones se ha sugerido que el término "vidrio" debería reservarse para aquellos materiales que están

formados por la solidificación continua de una sustancia fundida. De acuerdo con esta definición, los metales amorfos producidos por condensación o irradiación no se podrían clasificar estrictamente como vidrios. Sin embargo, parece ser que las propiedades y estructura de todos los materiales amorfos formados por cualquiera de estos métodos son similares entre sí. En consecuencia, creemos que no resulta justificado mantener una distinción en la correspondiente nomenclatura y en lo que sigue nos referiremos a todos estos materiales utilizando siempre el nombre de vidrios.

Una propiedad característica de todo proceso de solidificación ordinario (la transición de una fase líquida a una fase cristalina) consiste en el hecho de que, para sustancias puras, dicho proceso tiene lugar en forma discontinua, para una temperatura determinada y constante. A medida que se extrae calor de un líquido, su temperatura desciende hasta que el material en cuestión empieza a cristalizar; a partir de aquí, el calor que se sigue extrayendo del material no da lugar a ningún cambio ulterior en su temperatura en tanto que la solidificación no es completa. En el punto de solidificación otras muchas propiedades cambian también de forma discontinua. Como ejemplo, podemos citar la densidad y la capacidad calorífica (cantidad de calor que debe proporcionarse a una sustancia para producir un aumento determinado de temperatura).



TEMPERATURAS DE TRANSICION características de la formación de metales cristalinos y vidrios metálicos; ponen de manifiesto la mayor o menor facilidad con que una determinada aleación puede solidificarse y dar lugar a un estado vítreo. La temperatura de solidificación (T_s) es la temperatura para la que aparece por vez primera la fase cristalina cuando se enfría un líquido. Si la temperatura se reduce todavía más, el material atraviesa una región en la que se produce la cristalización antes de que se alcance la temperatura de vitrificación (T_v). La relación entre la temperatura de vitrificación y la temperatura de solidificación(T_v/T_s)se conoce con el nombre de temperatura de vitrificación reducida (T_{vr}) y define la extensión relativa de la región en la que la cristalización puede impedir la formación de un vidrio. Para poder cruzar esta región sin que se produzca dicha cristalización, el metal debe ser enfriado muy rápidamente desde una temperatura por encima de la temperatura de solidificación hasta otra temperatura por debajo de la temperatura de vitrificación. Existen tres clases de aleaciones susceptibles de dar lugar a un estado vítreo al someterlas a un enfriamiento rápido. En la presente figura se indican las temperaturas de transición para ciertas aleaciones típicas de cada una de estas tres clases.

La solidificación de la configuración que se observa para la temperatura de vitrificación no es una transición brusca; tampoco es una transición perfectamente continua. La transición en cuestión está caracterizada por un aumento acusado en el tiempo que se requiere para dar lugar a cualquier reajuste o reordenación de la configuración atómica. En el caso de un líquido este tiempo es mucho menor que un segundo; por ejemplo, para el agua, dicho tiempo es de unos 10^{-12} segundos. A la temperatura de vitrificación, el tiempo al que nos estamos refiriendo aumenta hasta un valor del orden de un día.

El tiempo necesario para que se produzca un cambio en la configuración atómica se pone de manifiesto experimentalmente en la viscosidad del correspondiente material, dado que esta magnitud mide la resistencia de dicho material a cambiar su forma. La unidad de viscosidad es el poise, que se define como la fuerza en dinas que debemos aplicar a un fluido para mantener una diferencia de velocidad de un centímetro por segundo entre dos capas paralelas cuya superficie sea de un centímetro cuadrado y que estén separadas entre sí por un centímetro. Los líquidos ordinarios, tales como el agua y el mercurio, tienen una viscosidad del orden de 10^{-2} poise; para la temperatura de vitrificación, la viscosidad aumenta rápidamente hasta alcanzar un valor del orden de 10^{15} poise. Una sustancia capaz de resistir hasta tal punto a los posibles cambios de forma debe ser considerada ya como un sólido.

La transición de un líquido a un vidrio viene también acompañada por una disminución brusca de la capacidad calorífica y del coeficiente de expansión térmica (esta última magnitud se refiere al cambio que tiene lugar en el volumen del material en cuestión cuando se produce un determinado cambio en la temperatura). Ambas propiedades están relacionadas con el movimiento libre de los átomos o con el número de configuraciones diferentes a las que éstos pueden acceder. Como señaló hace algún tiempo Walter J. Kauzmann, de la Universidad de Princeton, la disminución brusca de la capacidad calorífica y del coeficiente de expansión térmica están relacionadas directamente con la alteración de la configuración que supone el proceso de solidificación.

Las características de la transición líquido-vidrio que estamos describiendo se han deducido principalmente investigando los vidrios no metálicos. Más recientemente, Ho Sou Chen y uno de los autores de este artículo (Turnbull) han demostrado que las propiedades de las aleaciones metálicas con estructura vítrea son análogas a las de éstos. Las medidas de dichas magnitudes resultan difi-

cultadas por el hecho de que la región situada entre la temperatura de vitrificación y la temperatura de solidificación es inaccesible experimentalmente, puesto que los metales líquidos no se pueden mantener a tales temperaturas sin que se produzca su cristalización. Sin embargo, se ha demostrado que cuando se produce un enfriamiento hasta la temperatura de vitrificación la viscosidad aumenta de forma acusada. Se ha demostrado también que la transición inversa, en la cual se calienta un vidrio hasta que se convierte en líquido, viene acompañada por un aumento de su capacidad calorífica y del coeficiente de expansión térmica, de acuerdo con lo esperado.

Para las diferentes aleaciones metálicas estudiadas hasta la actualidad, los valores de la temperatura de vitrificación y la temperatura de solidificación presentan un intervalo muy amplio. Con el fin de poder comparar una sustancia con otra, resulta más significativo considerar la relación entre estas magnitudes, es decir, el valor del cociente entre la temperatura de vitrificación y la temperatura de solidificación. Esta relación se conoce con el nombre de temperatura de vitrificación reducida. Presumiblemente, cuanto mayor sea la temperatura de vitrificación reducida de una sustancia, tanto más fácil será su solidificación en forma vítrea, a través de una velocidad de enfriamiento menor, puesto que el intervalo de temperaturas para el que puede tener lugar la cristalización es también menor. Para la mayor parte de sustancias, esta previsión se ve confirmada por la experiencia. La temperatura de vitrificación reducida de los materiales susceptibles de alcanzar el estado vítreo mediante un enfriamiento lento (tales como los silicatos) es del orden de 2/3 o incluso mayor; en otras palabras, la temperatura de solidificación no supera a la temperatura de vitrificación más que en un factor de 1,5. El valor de la temperatura reducida de la mayoría de las aleaciones metálicas, que exigen un enfriamiento rápido, es inferior a 2/3 y en algunos casos resulta ser tan pequeño como 0,45.

La naturaleza metaestable de la fase amorfa se pone de manifiesto al calentar un vidrio. Incluso antes de que dicha sustancia se funda, el material considerado puede cristalizar gracias a la formación y crecimiento de centros de nucleación en el estado sólido. La temperatura a la que se observa este proceso, conocida con el nombre de temperatura de cristalización cinética, depende del número de centros de nucleación existentes y de la velocidad de calentamiento. Un calentamiento lento disminuye la temperatura de cristalización cinética, puesto que en tales condiciones se dispone de más tiempo para que se produzca el crecimiento del cristal. La diferencia entre la temperatura de cristalización cinética y la temperatura de vitrificación proporciona una medida aproximada de la resistencia de un vidrio a la cristalización. Algunos materiales tales como la sílice fundida no cristalizan en absoluto cuando están exentos de núcleos de solidificación externos (impurezas), independiente del valor de la temperatura a la que se trabaje y del tiempo invertido en la experiencia. Con pocas excepciones, en el caso de los vidrios metálicos, basta un ligero calentamiento por encima de la temperatura de vitrificación para provocar la cristalización. De hecho, existen muchas aleaciones cuya temperatura de cristalización cinética resulta ser menor que la temperatura de vitrificación. Sin embargo, este hecho no debería inducirnos a creer que los vidrios metálicos son inestables térmicamente. En realidad, muchas aleaciones subsisten en el estado vítreo por tiempo ilimitado a temperatura ambiente.

Un principio fundamental establece la inexistencia de un orden de largo alcance en la estructura de un vidrio. El conocimiento de las posiciones de los átomos en una región determinada de un sólido amorfo no nos permite predecir las posiciones de dichos átomos en otra región distante de la anterior. Sin embargo, a corto alcance, es decir, para distancias del orden de algunos espaciados interatómicos, sí que cabe esperar la existencia de un cierto orden. Tan sólo en el caso de un gas a baja presión, en cuyas condiciones los átomos se mueven con una independencia prácticamente total los unos de los otros, la distribución de dichos átomos se aproxima a un verdadero azar. El valor de la densidad observada experimentalmente en los sólidos y en los líquidos exige que los átomos de estas sustancias se presenten empaquetados en forma compacta. Por otra parte, sólo existe un número limitado de formas de cumplir este requisito. De todo ello se desprende que la estructura de dichos materiales debe presentar cierto orden de corto alcance.

La densidad presenta valores muy parecidos para los líquidos y los sólidos, en este último caso independientemente de que sean cristalinos o amorfos. Esta observación apoya la argumentación de que el número de átomos que rodean a un átomo dado y la distancia media interatómica son similares en ambas fases. Sin embargo, existen razones suficientes

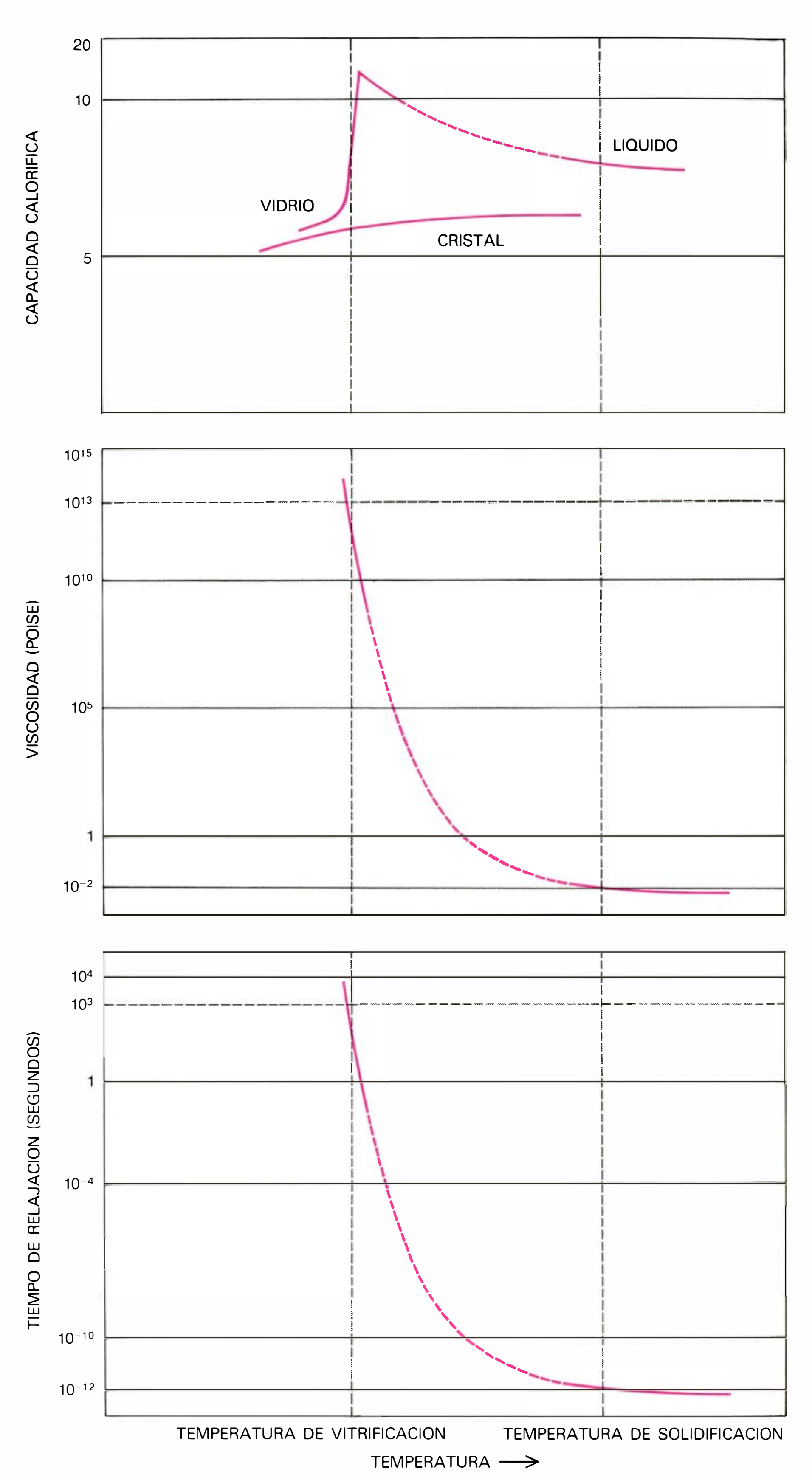
PRESION
TUBO DE CUARZO
ALEACION FUNDIDA
BOBINA DE CALENTAMIENTO
CINTA DE VIDRIO METALICO
DISCO FRIO

LAMINACION POR ROTACION de una aleación metálica fundida. Se trata de la técnica más utilizada en la actualidad para lograr la elevada velocidad de enfriamiento que se necesita para producir un vidrio metálico. La película metálica formada sobre la superficie del correspondiente líquido entra en contacto con el rotor, se enfría muy rápidamente debido a que dicha lámina es muy delgada, el rotor constituye un sumidero térmico de gran volumen y, por último, los metales son buenos conductores del calor. Con esta técnica se han alcanzado velocidades de enfriamiento del orden de mil grados Kelvin por milisegundo, es decir, a razón de un millón de grados Kelvin por segundo. En la producción comercial de vidrios metálicos se han puesto a punto otras técnicas similares a la descrita en la presente figura.

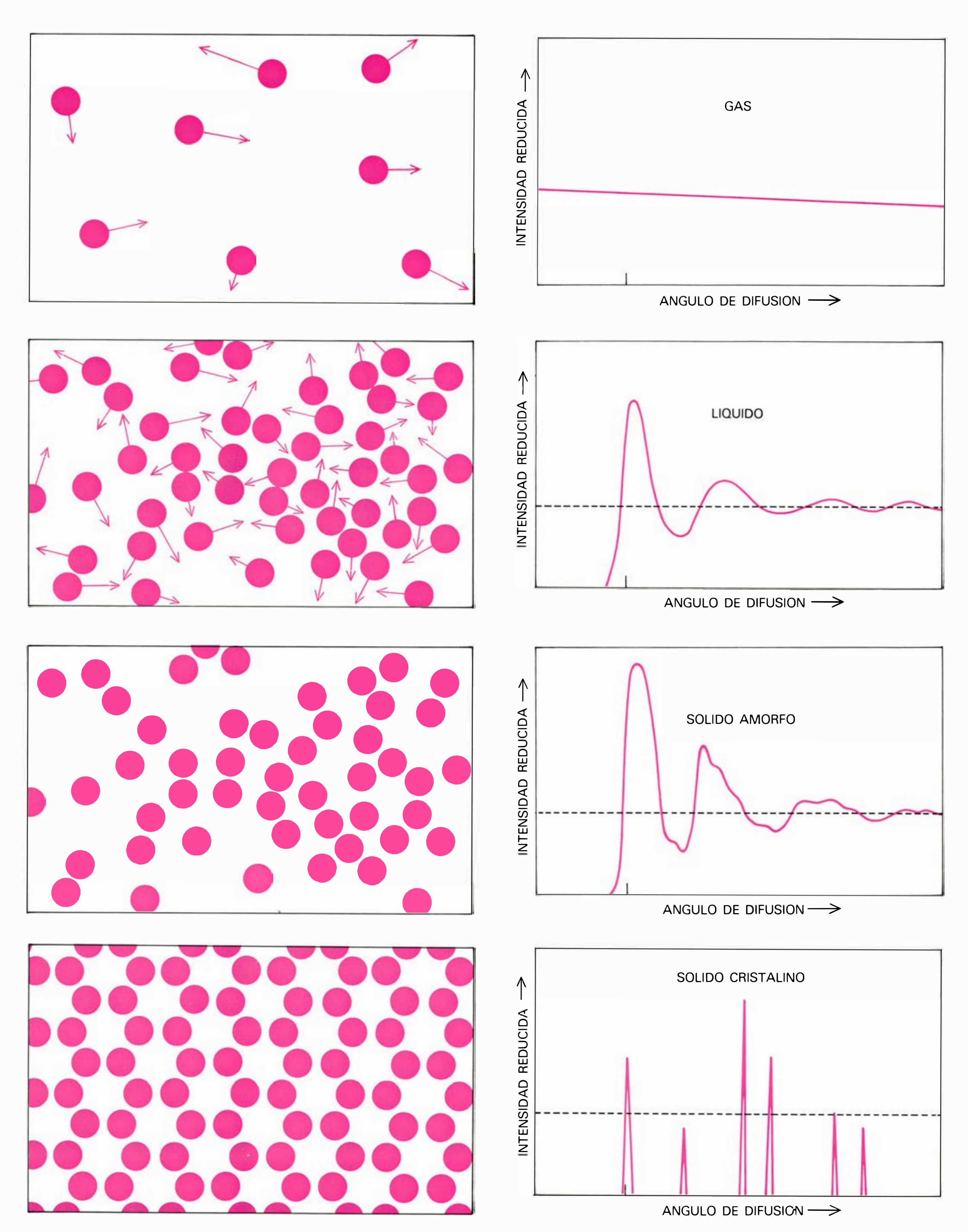
para creer que la topología de la ordenación atómica de un cristal difiere significativamente de la de los líquidos. Si se toma la precaución de excluir las fuentes de nucleación externas, muchos líquidos ordinarios se pueden subenfriar hasta temperaturas un 20 o un 30 por ciento por debajo de la temperatura de solidificación sin que se produzca su cristalización. La resistencia a que tenga lugar una congelación, a pesar de que este proceso resulta favorecido desde el punto de vista energético, pone de manifiesto que no es probable que la estructura cristalina se produzca durante las fluctuaciones al azar de los átomos del líquido. Como conclusión, podemos afirmar que el orden de corto alcance característico del líquido no parece estar íntimamente relacionado con el del cristal. Por otro lado, el orden de corto alcance del líquido y el del sólido amorfo presentan grandes semejanzas.

Cuando procedemos a construir los modelos de la estructura atómica de un metal simple, podemos suponer que las fuerzas que actúan entre los átomos no presentan ninguna dirección privilegiada; en otras palabras, consideramos que dichas fuerzas son simétricas alrededor de cualquier átomo. La máxima densidad corresponderá a aquella estructura cuya energía total sea mínima, en la que los átomos estén muy apretados unos con otros. Estos no pueden solapar excesivamente entre sí, debido a que para distancias muy pequeñas se produce una fuerte repulsión mutua. En muchos modelos teóricos se supone que los átomos se comportan como esferas macizas y, en consecuencia, su solapamiento no es posible.

Consideremos por el momento el empaquetamiento de los átomos en un sistema bidimensional con fuerzas centrales simétricas. En este caso, los átomos se representan en forma de discos y la unidad de empaquetamiento de máxima densidad está constituida por tres discos tangentes entre sí, de tal suerte que sus centros formen un triángulo equilátero. La adición de nuevos átomos a esta unidad básica da lugar a nuevas celdas triangulares que se van disponiendo en un mismo plano. En esta configuración cada átomo está rodeado por otros seis, formando un hexágono regular. Evidentemente, esta estructura es cristalina; las posiciones de todos los átomos se repiten periódicamente a lo largo de distancias ilimitadas. Sin embargo, es importante insistir en el hecho de que, aparte de su orden de largo alcance, la oportuna estructura resulta favorecida por la acción de fuerzas interatómicas de corto alcance. Independiente-



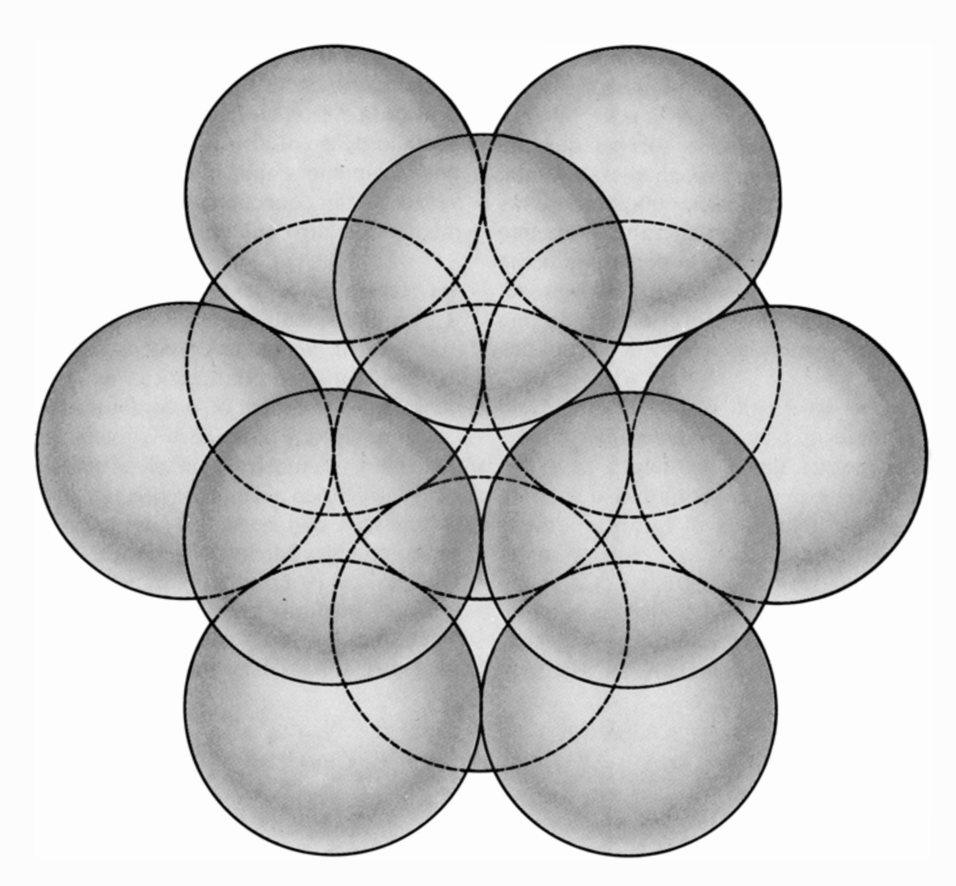
LAS TRANSICIONES LIQUIDO-VIDRIO vienen acompañadas por cambios importantes en ciertas propiedades del material. La capacidad calorífica, es decir, la cantidad de calor que debemos proporcionar a una sustancia para producir en ella una determinada elevación de temperatura, aumenta gradualmente a medida que un metal líquido se enfría por debajo de su temperatura de solidificación y disminuye bruscamente en el instante en que el líquido se convierte en un vidrio. La viscosidad, que mide la resistencia de un fluido a cambiar su forma, aumenta considerablemente al alcanzar la temperatura de vitrificación. Lo mismo sucede con el tiempo de relajación de la configuración atómica. Las porciones de las curvas representadas con líneas de trazos se refieren a aquellas temperaturas para las cuales no hay posibilidad de llevar a cabo las oportunas medidas de estas magnitudes, dado que el material en cuestión cristalizaría durante el tiempo que necesitaríamos para realizar tales medidas.



DISTRIBUCION DE LOS ATOMOS en una sustancia. Podemos deducirla a partir de las figuras que se obtienen en la difusión de rayos X por los respectivos átomos. En estas gráficas se representa la intensidad reducida de la radiación difundida en función del ángulo de difusión. La intensidad reducida se calcula a partir de la intensidad medida experimentalmente por un procedimiento de normalización. En el caso de un gas a baja presión, la intensidad reducida se mantiene prácticamente constante para un amplio intervalo de ángulos de difusión, poniendo así de manifiesto que los correspondientes átomos están distribuidos al azar. Las curvas que se obtienen en el caso de los líquidos y sólidos amorfos presentan una modulación muy acusada; una curva de este tipo sugiere la existencia de una cierta correlación entre las posiciones de los átomos próximos, aun cuando no exista una ordenación de largo alcance. Finalmente, en el caso de los cristales (*último diagrama, a la derecha*), la curva de intensidad reducida presenta una serie de máximos bien definidos; este hecho se halla relacionado con una ordenación regular de los átomos correspondientes para grandes distancias.

mente de que el sistema esté constituido por sólo tres átomos, o por muchos más, ninguna otra configuración puede poseer una densidad mayor o una energía menor que la de ésta. En consecuencia, el orden de corto alcance de un sistema de dos dimensiones será el mismo, tanto si el material está en fase líquida, en fase cristalina o en fase sólida amorfa. La resistencia a la cristalización de este material bidimensional será pequeña.

El empaquetamiento de objetos en el espacio tridimensional es diferente del que acabamos de describir en un aspecto fundamental. Si los átomos se representan mediante esferas, la unidad básica de empaquetamiento más denso consistirá en cuatro átomos en contacto entre sí, cada uno de los cuales ocupa un vértice de un tetraedro regular. Un hecho geométrico de enorme importancia para la estructura de los sólidos consiste en que el espacio no se puede llenar totalmente empaquetando un conjunto de tetraedros regulares. Ciertamente, se puede conseguir que se agrupen sin dificultad un número reducido de tetraedros, pero a este conjunto sólo se le pueden añadir nuevos tetraedros produciendo una distorsión de los anteriores o dejando huecos entre ellos. Cualquiera de estas dos alternativas disminuye la densidad del sólido resultante y aumenta su energía total. En consecuencia, el tetraedro por sí solo no nos sirve como unidad fundamental de una estructura cristalina; el empaquetamiento cristalino de máxima densidad se obtiene intercalando un octaedro entre cada dos tetraedros, pero en este caso la estructura resultante posee una densidad menor y una energía por átomo mayor que las que corresponden a una estructura tetraédrica pura.



MODELO MICROCRISTALINO: interpreta la estructura de los vidrios metálicos suponiendo que estos materiales están constituidos por muchos agregados cristalinos, cada uno de los cuales sólo está formado por alrededor de un centenar de átomos. La estructura del agregado que se ha representado en esta figura corresponde a la máxima densidad posible de átomos en un cristal; en otras palabras, dicho agregado es la configuración más compacta de átomos que se puede extender indefinidamente en el espacio. En el modelo microcristalino los agregados de este tipo se enlazan entre sí mediante una red de átomos dispuestos adecuadamente. Falta por especificar la naturaleza de este tejido de unión.

Las restricciones geométricas que caracterizan el empaquetamiento de átomos en tres dimensiones ha tenido una gran influencia en el desarrollo de los modelos de estructuras amorfas. Aunque toda estructura cristalina corresponde siempre a aquel estado cuya energía total es menor para un conjunto suficientemente grande de átomos en un espacio de tres dimensiones, ello no es cierto para un agregado constituido por unos pocos átomos. Dicho agregado puede llegar a poseer una densidad mayor y una energía de empaquetamiento menor si se adopta una configuración poliédrica. Los diferentes modelos que intentan describir la estructura de los líquidos y de los sólidos amorfos deben tener en cuenta esta circunstancia.

En el caso de los vidrios metálicos se han elaborado tres clases diferentes de modelos. Los modelos microcristalinos sugieren que los metales amorfos consisten de hecho en un número muy grande de regiones de pequeño tamaño con un orden cristalino de corto alcance intercaladas en una red o matriz de átomos enlazados entre sí al azar. Por término medio, cada uno de los microcristales en cuestión están constituidos por unos 100 átomos, muchos menos de los que contienen los granos más pequeños de un cristal metálico real. Puesto que estos cristales en miniatura se encuentran dispersos al azar en el seno del sólido y orientados también al azar, no se pone de manifiesto un orden de largo alcance. La naturaleza de la red en la que se hallan intercalados los microcristales no se ha especificado con detalle.

Un segundo tipo de modelo, introducido por J. D. Bernal para dar cuenta de la estructura de los líquidos simples, presenta en la actualidad un interés puramente histórico. Este modelo describe el empaquetamiento denso al azar de esferas macizas. Un procedimiento para construir dicho modelo consiste en añadir esferas de una en una a un agregado de esferas. Cada esfera se incorpora en aquella posición disponible que se encuentre más próxima al centro del agregado en cuestión. Procediendo de este modo, la densidad de la configuración resultante es la máxima posible. Las cuatro primeras esferas forman inevitablemente un tetraedro. La quinta esfera se puede colocar sobre cualquiera de las cuatro caras simétricas del tetraedro, puesto que todas ellas equidistan del centro. Cuando el agregado crece mucho más, la operación de encontrar la posición correcta de las sucesivas esferas se hace mucho más difícil y la geometría de la estructura envolvente no resulta tan evidente.

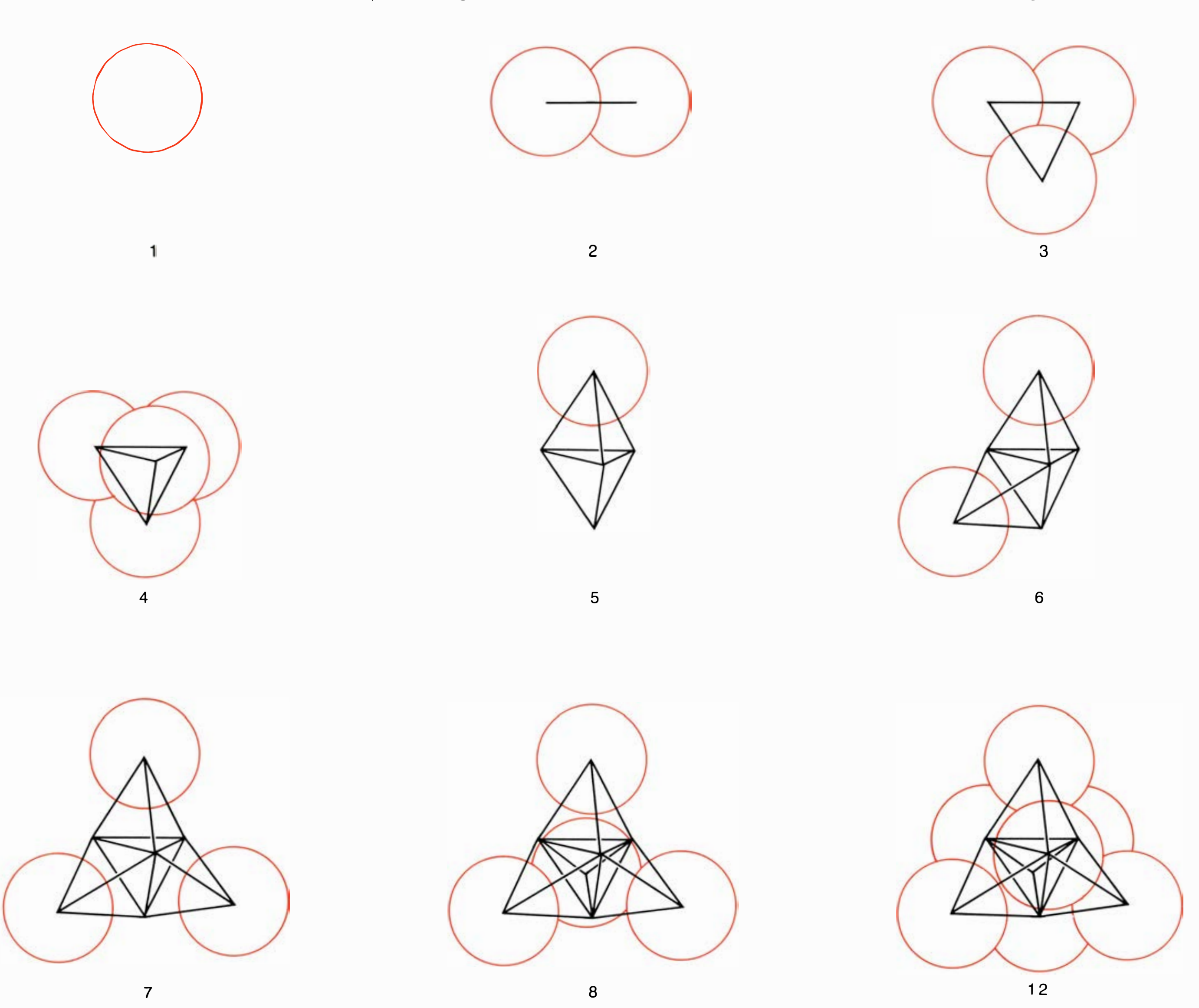
La primera investigación del empaquetamiento denso al azar fue llevada a cabo con la ayuda de un modelo físico. Bernal y sus colaboradores introdujeron las esferas de acero de unos rodamientos a bolas en la cámara de goma de un balón de fútbol y amasaron la cámara hasta que no se pudo comprimir más. Para inmovilizar a las esferas de referencia se vertió cera en la cámara y, a continuación, se eliminó dicho recipiente. Acto seguido, se anotaron meticulosamente las coordenadas de las esferas existentes en los volúmenes representativos de la muestra. Hoy en día es más frecuente construir un modelo con ayuda de un ordenador, determinando matemáticamente las posiciones correctas de las esferas. El equivalente de la

operación de amasar a mano consiste en un procedimiento de "ablandar" el modelo comprobando las fuerzas que actúan sobre cada esfera; en el caso de que dichas esferas no estén equilibradas, sus posiciones se pueden alterar ligeramente con el fin de reducir la correspondiente tensión. Es muy posible que estos procesos de relajación sean el origen de una disminución en la energía de los sólidos reales.

¿Qué estructura resulta realmente al aplicar este procedimiento? Bernal demostró que dicha estructura se podía describir como un conjunto de tetraedros, distorsionados en varios sentidos y combinados con pequeños huecos, enlazados por caras triangulares. Como ha demostrado uno de los autores (Chaudhari) y sus colaboradores, e independientemente de ellos G. A. N. Connell, actualmente en el Centro de Investigación de la Xerox en Palo Alto, un empaquetado denso al azar es equivalente topológicamente a una red al azar cuyos vértices están conectados unos con otros mediante cuatro enlaces cada uno.

La tercera clase de modelo se deduce explícitamente de la observación de que para un agregado de pocos átomos la configuración tetraédrica es más densa que cualquier otra configuración cristalina. F. C. Frank, de la Universidad de Bristol, demostró que el empaquetado tetraédrico resulta favorecido para los cuerpos con hasta 13 átomos. Más recientemente, Michael R. Hoare, de la Universidad de Londres, y James J. Burton, del Instituto Gur Ayeh de Nueva York, han llevado a cabo otros cálculos análogos a éstos basados en ciertas hipótesis plausibles acerca de las fuerzas que actúan entre los átomos y han demostrado que los agregados poliédricos son más estables que los cristalinos de hasta 50 átomos. Disponemos también de pruebas experimentales directas del modelo de agregados poliédricos. J. Farges, de la Universidad de París, ha demostrado que se pueden formar agregados constituidos por algunas decenas de átomos de argón por condensación del correspondiente vapor. La estructura de estos agregados se parece mucho a la predicha para los agregados poliédricos. Sin embargo, se debería tener en cuenta que los agregados de argón existen aislados, en tanto que los conjuntos poliédricos de un metal amorfo tendrían que estar interconectados por una matriz de átomos en otra configuración diferente.

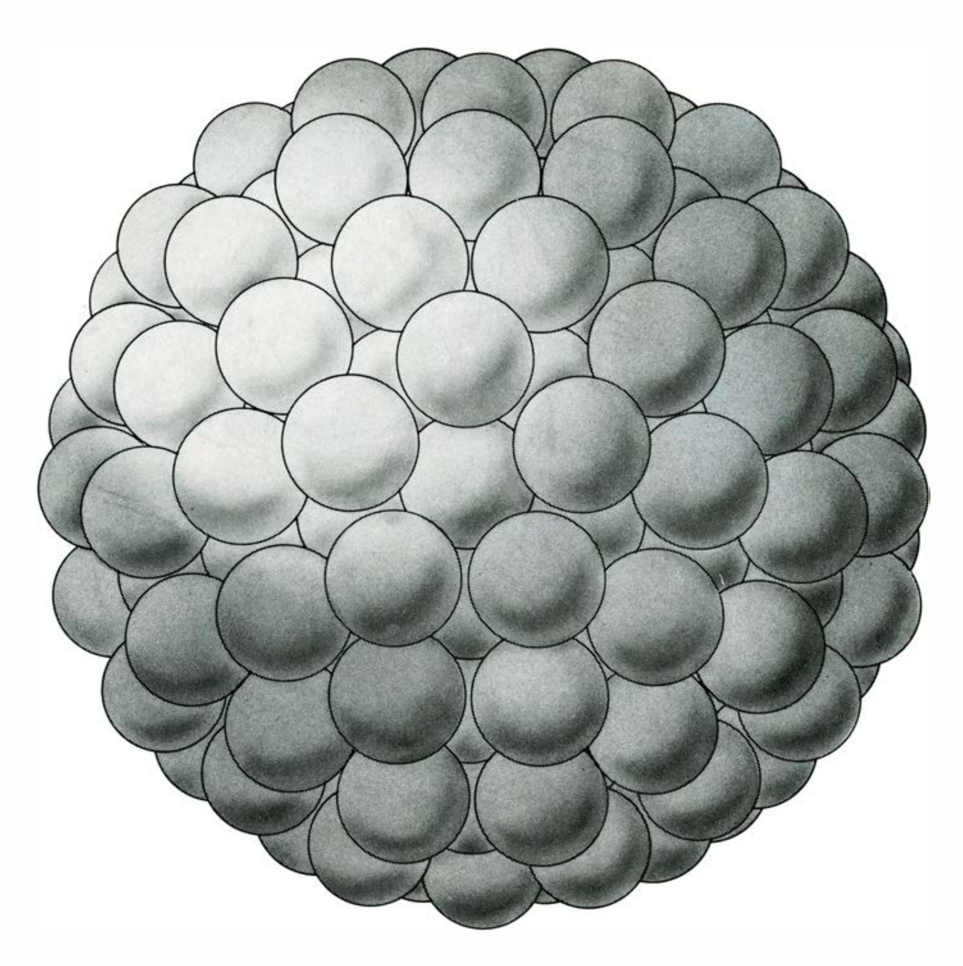
Todos estos modelos presentan ciertas



MODELO DE EMPAQUETAMIENTO DENSO AL AZAR, característico del orden de corto alcance típico de los vidrios metálicos. Se construye ensamblando un cierto número de esferas en una forma tal que la configuración resultante sea lo más compacta posible. Cada una de las etapas de construcción de este modelo consiste en añadir una nueva esfera en la posición más cercana posible al centro del correspondiente agregado. Las cuatro primeras esferas constituyen un tetraedro regular. La densidad de la configuración tetraédrica es la máxima posible (mayor que la de cualquier cristal), pero dicha configuración no puede extenderse indefinidamente debido a que los tetraedros regulares no pueden llenar el espacio sin dejar huecos entre ellos. No obstante, la estructura que propone el modelo de empaquetamiento denso al azar está constituida por unidades tetraédricas.

limitaciones. Una limitación muy importante consiste en el hecho de que todos ellos se refieren a materiales puros o con un solo componente (todas las esferas son idénticas), cuando precisamente sabemos que ningún material de esta clase ha sido solidificado en estado vítreo. Al parecer, tan sólo las aleaciones de dos o más metales pueden formar vidrios. Por su parte, los modelos microcristalino y poliédrico presentan una limitación adicional en el sentido de que se ignora la matriz de interconexión, a pesar de que dicha matriz puede referirse a la mitad del material. En cualquier caso, existe la posibilidad de comparar dichos modelos con los datos relativos a la estructura de metales amorfos reales.

La principal fuente de información de que podemos disponer para investigar la estructura microscópica de los vidrios es la difusión de rayos X, electrones y neutrones por los átomos. Estas experiencias consisten en irradiar una muestra con, por ejemplo, rayos X cuya longitud de onda sea comparable al diámetro de los átomos. A continuación se mide la intensidad de la radiación difundida en función del ángulo para el cual resulta difundida. Analizando la correspondiente figura de difusión, se puede deducir la distribución media de los átomos. El estudio de la difusión de rayos X por un cristal simple permite conocer con precisión las coordenadas de los átomos que lo constituyen. En el caso de materiales amorfos la información es menos completa; debido al desorden de las correspondientes estructuras tan sólo se pueden determinar las distancias entre los átomos, no sus posiciones. Este método se aplicó por primera vez a los sólidos amorfos por Frits Zernike y J. A. Prins en el año 1927.

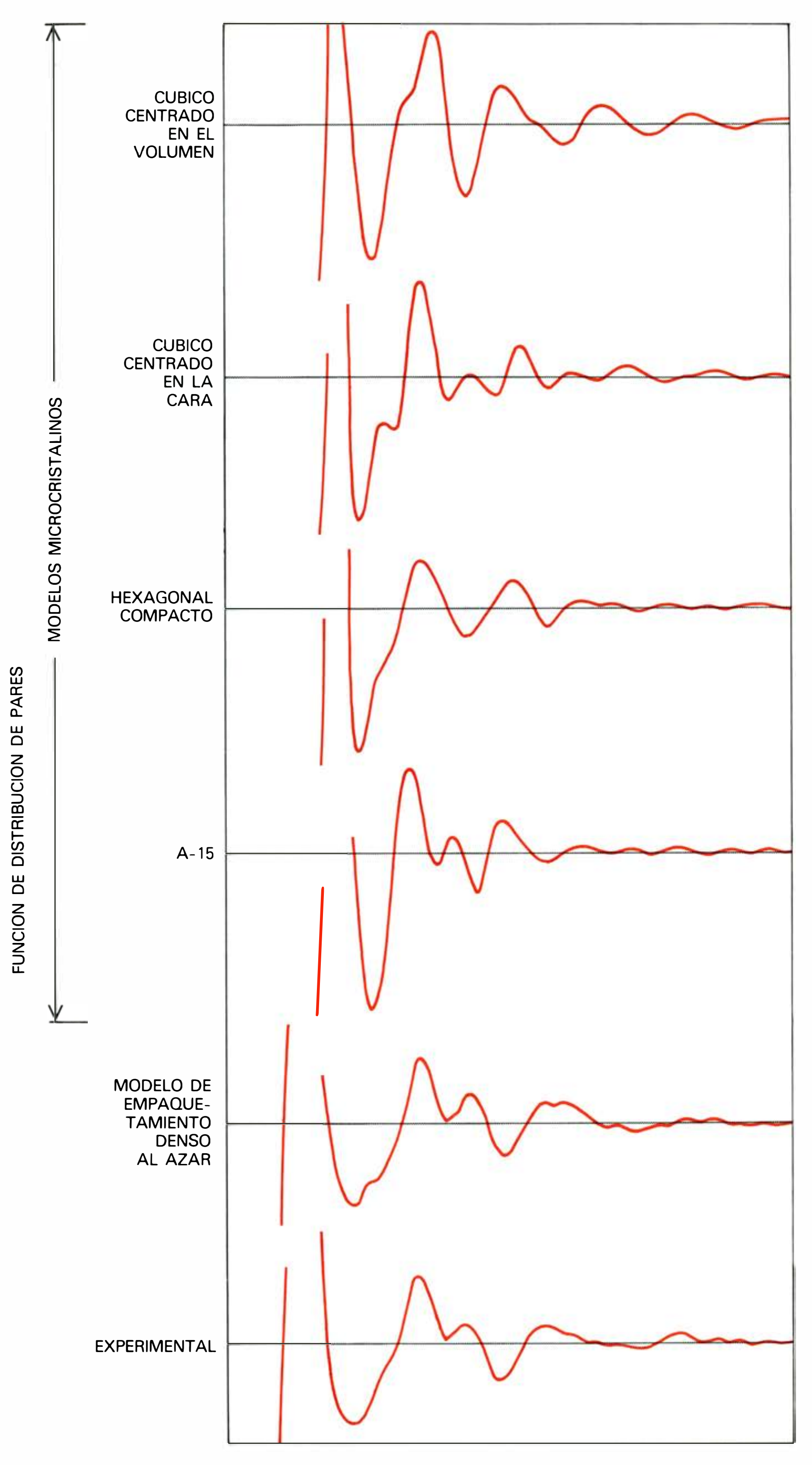


MODELO POLIEDRICO de un vidrio metálico: supone que los respectivos átomos se unen entre sí formando una estructura regular. Se ha demostrado que para agregados constituidos por 50 átomos como máximo, la energía libre que predice dicho modelo poliédrico es menor que la que corresponde a cualquier configuración cristalina. Sin embargo, en el caso de considerar un sólido extenso, estos agregados se deben conectar entre sí mediante una red de átomos tal que la energía de la estructura resultante, considerada como un todo, resulta ser mayor que la de un cristal. El modelo poliédrico posee una simetría de quinto orden; los objetos que presentan esta clase de simetría no pueden llenar el espacio totalmente. El modelo poliédrico representado en esta ilustración está constituido por 266 átomos y fue construido por el profesor Michael R. Hoare, que se encuentra en la Universidad de Londres.

En el caso de un gas monoatómico, la curva que representa la intensidad de la radiación difundida no muestra apenas ningún rasgo destacado. Este resultado se puede interpretar teniendo en cuenta la absoluta falta de correlación existente entre las posiciones de los átomos de estas sustancias. Si se toma un átomo como punto de referencia, la probabilidad de encontrar otros átomos a cualquier distancia es constante. En el caso de un sólido cristalino, la curva de intensidad de la radiación difundida presenta una secuencia de picos acusados como consecuencia de la casi perfecta correlación de las posiciones atómicas a lo largo de todo el volumen del cristal. Los líquidos y los sólidos amorfos proporcionan figuras intermedias a estos dos casos extremos: se ponen de manifiesto importantes modulaciones en intensidad, pero dichas modulaciones no se presentan tan bien definidas como en el caso de los cristales, apareciendo enmascaradas por un fondo continuo. La forma general de las curvas correspondientes a los líquidos y los vidrios es muy similar, aunque en el caso de estos últimos se pone de manifiesto la existencia de una cierta estructura fina que resulta un tanto más difusa para los líquidos en virtud del movimiento de traslación de los correspondientes átomos.

Antes de proceder a la interpretación de estas curvas de intensidad difundida se les suele aplicar una transformación matemática. La curva transformada se conoce con el nombre de función de distribución radial y proporciona el valor de la densidad media de átomos en función de la distancia a partir de un átomo de referencia. Una segunda curva, derivada también de la anterior, recibe el nombre de función de distribución de pares. El valor de esta función se obtiene restando, de la función de distribución radial, ciertas contribuciones de la intensidad difundida, tales como la difusión por parte de los átomos individuales. La función de distribución de pares representa el número de pares de átomos en función de la separación entre los dos átomos que constituyen un par.

La función de distribución radial típica de un vidrio metálico muestra una serie de cuatro o cinco picos cuya amplitud decrece paulatinamente. El área encerrada en estos picos es proporcional al número de átomos existentes para la correspondiente distancia. La anchura de los picos pone de manifiesto cuán próximos se encuentran agrupados los respectivos átomos para una distancia radial determinada. El primer pico representa la contribución de los átomos vecinos más próximos y es comparativamente más acusado que los restantes, debido a que los átomos vecinos más próximos se encuentran a distancias



FUNCION DE DISTRIBUCION DE PARES. Nos permite comparar el modelo microcristalino y el modelo de empaquetamiento denso al azar con los datos experimentales relacionados con la estructura de un vidrio metálico real. Esta función se puede calcular a partir de las figuras obtenidas en la difracción de rayos X y proporciona el número medio de pares de átomos en función de la distancia entre los dos átomos que constituyen un par. Dichas funciones se han calculado para cuatro tipos diferentes de estructuras microcristalinas, suponiendo que los cristales poseen todas las orientaciones posibles, pero sin tomar en consideración el material existente entre ellos. El modelo de empaquetamiento denso al azar utilizado en estos cálculos ha sido un tanto "suavizado", modificando las posiciones de algunos átomos con el fin de mitigar la tensión. La función experimental corresponde a una aleación amorfa de hierro. La curva teórica que predice el empaquetamiento denso al azar se ajusta a la curva experimental mejor que lo hace cualquier curva microcristalina. Los datos experimentales y los valores teóricos corresponden a un trabajo realizado por T. Ichikawa, de la Universidad de Tohoku.

muy similares entre sí; de hecho, tales átomos se hallan empaquetados tan cerca como sea posible del átomo de referencia. A medida que crece la separación entre los átomos, la anchura de los picos aumenta; para distancias superiores a unos cuatro diámetros atómicos, su efecto es prácticamente nulo y la densidad atómica se aproxima a la densidad media del material considerado como un todo.

En un modelo de estructura amorfa, las posiciones de los átomos se conocen con absoluta precisión. En consecuencia, el cálculo de la función de distribución radial o función de distribución de pares para un sólido dado es muy simple. El método a seguir consiste básicamente en tabular las distancias existentes entre todos los pares de átomos del modelo. De este modo se puede comparar el valor de la función que proporciona teóricamente el modelo con las deducidas a partir de los datos obtenidos en la difusión de rayos X u otras radiaciones por materiales amorfos reales.

El resultado de dichas comparaciones ha hecho surgir serias dudas acerca de la validez del modelo microcristalino. La función de distribución radial que predice el modelo se ajusta muy deficientemente con la función deducida experimentalmente. Utilizando el modelo de empaquetado denso al azar, el acuerdo obtenido es mucho mejor, en especial si se recurre a una versión de dicho modelo en la cual las posiciones de los átomos se consideran un tanto indefinidas.

La función de distribución radial no nos permite distinguir con claridad cuál de estos dos modelos, el de empaquetado denso al azar o el poliédrico, resulta más adecuado. Sin embargo, podemos resolver este problema recurriendo a una base diferente. Farges ha demostrado recientemente que los átomos de argón presentan una estructura poliédrica cuando esta sustancia se condensa a partir del vapor. En última instancia, esta observación pone de manifiesto la posibilidad de obtener una configuración poliédrica de los átomos.

No obstante, esta argumentación plantea otro problema. El argón condensado por Farges es un elemento puro; si los agregados poliédricos de los átomos de argón se han formado según el mismo mecanismo que se supone que opera en el caso de los vidrios metálicos, cabría pensar en la posibilidad de preparar metales puros en forma vítrea. Incluso suponiendo que tales vidrios elementales no se pudieran obtener por enfriamiento de un líquido, podrían observarse en materiales formados por condensación de un vapor, tal como sucede

con el argón. De hecho, la experiencia indica que para que se forme un vidrio por cualquiera de los dos métodos antes citados es necesario que exista cierta cantidad de impurezas en el correspondiente material.

Los elementos que constituyen las aleaciones amorfas proceden de diferentes regiones del sistema periódico. Entre estos elementos hay metales de transición, tanto de los grupos "primeros" (tales como el zirconio y el niobio) como de los grupos "últimos" (hierro y níquel), metales nobles (oro y paladio), metales simples (calcio y aluminio), tierras raras (gadolinio) y metaloides (silicio, fósforo, carbono y boro). La mayoría de las aleaciones capaces de ser enfriadas desde un estado líquido hasta un estado amorfo se inscriben en alguno de los tres grupos siguientes. El primer grupo viene tipificado por un compuesto de oro y silicio que fue estudiado por primera vez hace 20 años por Duwez y sus colaboradores; estas aleaciones consisten en la combinación de un metal noble o un metal de transición con un metaloide o con más de un metaloide. Dentro de las mezclas que dan lugar a la formación de vidrios se incluyen ciertas aleaciones eutécticas cuyas temperaturas de solidificación son extremadamente bajas. La mayor parte de los vidrios de aleación de hierro que hoy son objeto de atención en base a sus posibles aplicaciones tecnológicas pertenecen a este grupo. Muchos de ellos fueron preparados por primera vez por Chen, Donald E. Polk y R. Ray, que a la sazón estaban trabajando en la Allied Chemical Corporation.

El segundo tipo de vidrios metálicos, descubierto por uno de los autores de este artículo (Giessen), junto con Nicholas J. Grant, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, consiste en aleaciones constituidas por un metal de transición de los grupos primeros y un metal de transición de los grupos últimos. Como ejemplo de estos compuestos podríamos citar una aleación de niobio y níquel que responde a la fórmula $Nb_{40}Ni_{60}$. Las aleaciones que pertenecen al tercer grupo están constituidas exclusivamente por metales, como sucede por ejemplo con una aleación de calcio y aluminio cuya fórmula es $Ca_{65}Al_{35}$. La posibilidad de que estos metales formen vidrios fue puesta de manifiesto por primera vez por Giessen y Polk, que actualmente trabaja en la Universidad del Nordeste, así como H. Matyja y otros colaboradores, de la Universidad Técnica de Varsovia.

La relación de metales que se pueden condensar a una fase amorfa partiendo de un vapor incluye muchas de las aleaciones anteriormente citadas y otras sustancias cuya conversión en un material vítreo sólo se puede lograr por este camino. Entre estas últimas cabe citar ciertas aleaciones de niobio y germanio, de plata y cobre, de oro y cobalto y algunas de gadolinio y cobalto. Los primeros estudios acerca de la preparación de aleaciones amorfas a partir de los correspondientes vapores fueron llevados a cabo por S. Mader, de la International Business Machines Corporation, y Arthur S. Nowick, que trabaja en la actualidad en la Universidad de Columbia, e independientemente de ellos, por W. Bückel y R. Hilsch, de la Universidad de Göttingen. Los vidrios formados a partir de aleaciones de tierras raras y metales de transición fueron descubiertos por los investigadores de la IBM y del Naval Ordnance Laboratory.

Los métodos más corrientes de preparación de vidrios metálicos a partir de los correspondientes estados fundidos son en todo caso otras tantas versiones diferentes de la técnica de la laminación por rotación, en la que un chorro de la aleación fundida se lanza sobre un rotor metálico frío. El vidrio enfriado se separa tangencialmente del rotor formando una cinta continua. El proceso se ha adaptado a una escala mayor para la producción de cantidades comerciales de aleaciones vítreas. Dado que la cinta o lámina a la que nos hemos referido anteriormente emerge directamente del estado fundido sin que sea necesario apenas ningún otro tratamiento posterior, el método descrito es muy económico; de hecho, puede resultar incluso más barato que el proceso de preparación de los metales cristalinos. En consecuencia, los vidrios metálicos se pueden utilizar incluso en aquellas aplicaciones en las que las propiedades pertinentes son análogas a las que presentan los metales cristalinos.

Muchas de las propiedades de los vidrios metálicos, tales como la densidad, la capacidad calorífica y la compresibilidad, difieren muy poco de las propias de los metales cristalinos cuya composición es idéntica. Las diferencias surgen fundamentalmente para aquellas propiedades que miden la respuesta de un cuerpo a una fuerza dirigida. En el caso de los cristales, la respuesta a un campo magnético o eléctrico o a una fuerza que pretenda alargar el cuerpo depende de la orientación del campo o de la fuerza en cuestión respecto a la red cristalina. Se dice entonces que dicha respuesta es anisótropa. Dado que un metal vítreo no presenta un orden de largo alcance, su respuesta debería ser perfectamente isótropa, es decir, independiente de la dirección. La existencia de otras diferencias análogas en otras propiedades de estos materiales se puede atribuir al hecho de que la estructura amorfa es básicamente continua y homogénea para grandes volúmenes. Por otra parte, la mayoría de los materiales cristalinos y, en particular, la mayoría de los metales cristalinos, están constituidos por pequeños granos cristalinos que presentan límites irregulares y que están orientados al azar.

Los vidrios de silicatos son duros y fracturables. En general, también lo son los sólidos cristalinos cuyas composiciones son similares a las de las aleaciones que se pueden transformar en vidrios por enfriamiento a partir del estado fundido. Por el contrario, algunos de los propios vidrios metálicos son dúctiles y cuando se les somete a una tensión se comportan como las aleaciones más fuertes. Su respuesta ante una fuerza de estiramiento es isótropa y el carácter de dicha respuesta difiere del observado en el caso de los silicatos vítreos y metales policristalinos. Un silicato vítreo se fractura cuando se le somete a una cierta sobretensión; un metal cristalino se dobla gracias al movimiento de defectos estructurales a lo largo de ciertos planos de dislocación definidos cristalográficamente, lo cual se traduce en un aumento de su resistencia a cualquier deformación ulterior. En general, cuando un metal amorfo se somete a una sobretensión, se produce una cizalladura a lo largo de ciertas bandas cuyo plano forma un ángulo de 45 grados respecto a la dirección de estiramiento. Se ha observado que las propiedades mecánicas de ciertos vidrios polímeros son similares a las descritas anteriormente.

El carácter quebradizo o fracturable de los silicatos vítreos es una consecuencia de la propia estructura química que los mantiene en un estado amorfo. Debido al carácter altamente direccional de los enlaces covalentes entre los átomos, la deformación sólo es posible cuando se produce una ruptura de dichos enlaces. En un vidrio metálico, por el contrario, los enlaces no son nada direccionales; en consecuencia, existe la posibilidad de que se produzcan pequeños desplazamientos de los átomos en respuesta a las tensiones aplicadas, con lo cual dichos materiales se deforman plásticamente.

En los metales policristalinos, los ataques químicos tienen lugar preferentemente en la periferia de los granos y las heterogeneidades químicas. Las pruebas actuales sugieren que la estructura de las aleaciones vítreas es muy homogénea para cualquier escala mayor que unos pocos diámetros atómicos. Esta uniformidad en la estructura nos permite pre-

decir que la resistencia a la corrosión de los vidrios metálicos debe ser excepcionalmente alta. De hecho, varios investigadores han puesto de manifiesto que la resistencia a la corrosión de ciertos vidrios constituidos por metales de transición y aleaciones de metaloides que contienen cromo resulta ser muy elevada.

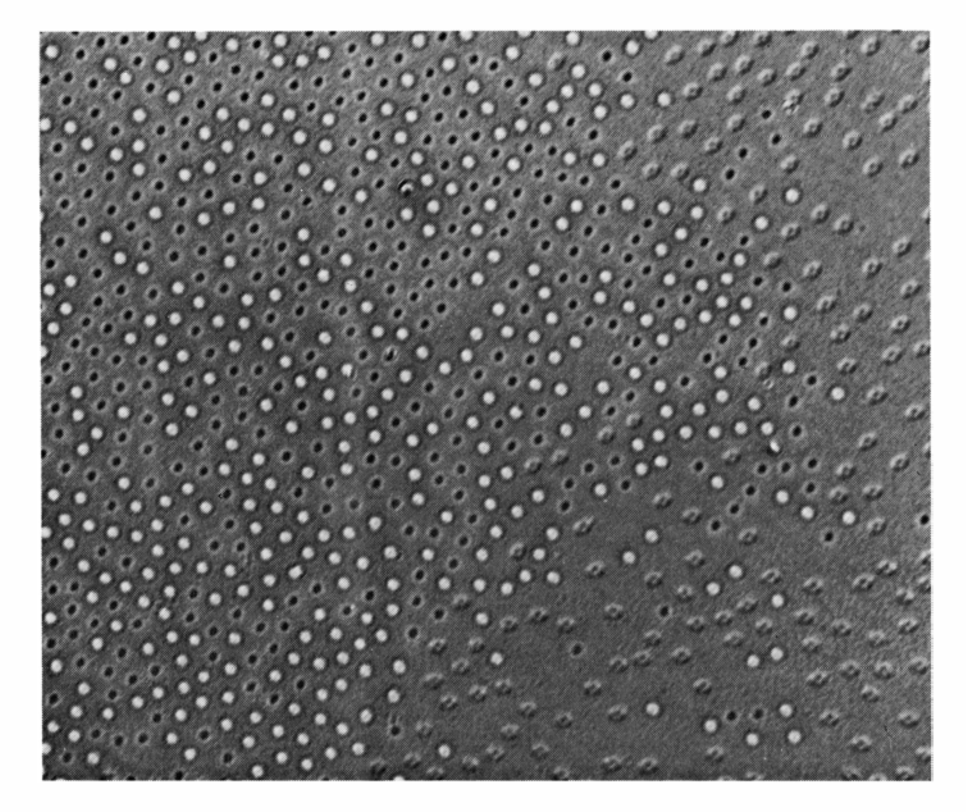
La resistencia a la deformación, la ductilidad y la resistencia a la corrosión constituyen un conjunto de propiedades enormemente atractivas en un metal. Se pueden imaginar muchas aplicaciones en las que dichas propiedades podrían ser utilizadas. Más aún, las propiedades mecánicas y químicas que hacen que las aleaciones vítreas se puedan trabajar con facilidad, junto con el hecho de que la fabricación de estos materiales sea muy económica, justifican su utilización en toda una serie de aplicaciones basadas en sus peculiares propiedades eléctricas y magnéticas.

La resistencia al flujo de los electrones en los metales es una consecuencia de las irregularidades existentes en la disposición periódica de los átomos. La resistividad de un metal cristalino, o resistencia por unidad de sección transversal, tiene dos componentes principales: las vibraciones térmicas de los átomos (que introducen un grado de desorden que decrece al disminuir la temperatura) y las impurezas y defectos estructurales (cuya contribución es prácticamente independiente de la temperatura). La suma de estas contribuciones es una resistividad cuyo valor disminuye al enfriar el material en cuestión, tendiendo a un valor mínimo y constante cuando la temperatura tiende al cero absoluto.

Dado que la estructura de los metales amorfos muestra un desorden total, la resistividad de estos materiales es elevada; el valor de esta magnitud suele ser un orden de magnitud mayor que el de la resistividad de la misma aleación en forma cristalina. Por otra parte, la contribución debida al desorden estructural y a las impurezas supera con creces a la componente térmica. De aquí se desprende que la resistividad no es muy sensible a la temperatura; el coeficiente de variación de la resistividad con la temperatura es pequeño. Cambiando la composición de dichos materiales se puede conseguir que dicho coeficiente sea igual a 0 o alcance un valor negativo para temperaturas ambientes.

La estabilidad de la resistividad de las aleaciones vítreas respecto a los cambios de temperatura sugiere su utilización como patrones de resistencia. Una aplicación relacionada con esta propiedad serían los sensores magnetorresistivos; estos dispositivos permiten detectar la presencia de campos magnéticos, fundamentalmente en memorias de burbujas. El funcionamiento de los sensores de magnetorresistencia se basa en el hecho de que las variaciones en la intensidad de un campo magnético dan lugar a un pequeño cambio en la resistividad de un metal; evidentemente, las fluctuaciones espúreas que se producen en la resistividad, motivadas por los cambios en la temperatura, tienden a obscurecer la correspondiente señal.

Otro tipo de sensor de campos magnéticos para el que existe la posibilidad de utilizar aleaciones amorfas se basa en el efecto Hall extraordinario. Cuando a través de una lámina delgada pasa una corriente eléctrica, la aplicación de un campo magnético da lugar a la aparición de un voltaje cuya dirección es perpendicular tanto a la corriente como al campo en cuestión. En el caso de materiales ferromagnéticos, este efecto recibe la calificación de extraordinario debido al hecho de que el citado voltaje es mucho mayor que para los otros metales. Utilizando láminas ferromagnéticas amorfas se podría conseguir que los voltajes Hall fueran todavía mayores. Estos voltajes son proporcionales al cuadrado de la resistividad del metal y, en consecuencia, deberían ser 100 veces mayores en una aleación amorfa de lo que lo son en una lámina cristalina de la misma composición.



LAS BURBUJAS MAGNETICAS de una aleación amorfa se podrían utilizar para almacenar información en un ordenador. Estas burbujas consisten en dominios de magnetización inversa y aparecen en las láminas de vidrios metálicos que han sido magnetizadas en una dirección perpendicular al plano de la lámina. Las burbujas en cuestión pueden observarse en la microfotografía que se reproduce aquí, obtenida por Sigfrid R. Herd y uno de los autores de este artículo (Chaudhari) utilizando un microscopio electrónico de transmisión. Algunas de las burbujas aparecen brillantes con los bordes oscuros, otras son oscuras con los bordes brillantes y un tercer tipo es brillante por un lado y oscuro por el otro, dando así la impresión de ser pozos o montículos. De hecho, estas tres clases de burbujas difieren únicamente en la topología de su región periférica, en donde el campo magnético cambia desde una polaridad normal a una polaridad inversa. Cada burbuja tiene un diámetro del orden de 0,1 micrometros; este tamaño es del orden de la quinta parte del que poseen las burbujas más pequeñas que se pueden obtener en los materiales cristalinos, tales como el granate sintético. De aquí que una memoria basada en las burbujas magnéticas de un medio amorfo podría almacenar información con una densidad que es veinticinco veces mayor que la que se puede obtener utilizando materiales cristalinos.

Por el momento, las aplicaciones más prometedoras de los vidrios metálicos se basan en las peculiares propiedades magnéticas de los metales amorfos. En general, los materiales cristalinos poseen un eje de magnetización preferente. Para cambiar la dirección de imantación desde este eje a otro cualquiera es necesario aportar cierta cantidad de energía. Por el contrario, muchos vidrios metálicos parecen ser totalmente isótropos por lo que respecta a los campos magnéticos. No existe un eje de magnetización preferente y, por tanto, dicha magnetización se puede variar a costa de una

aportación de energía mucho menor. En el núcleo de un transformador eléctrico, la magnetización debe invertir su dirección dos veces durante cada ciclo de la corriente alterna, lo cual equivale a 120 veces por segundo en los Estados Unidos (unas 100 veces por segundo en España). La pérdida de energía asociada con estas inversiones puede llegar a ser muy importante. Se ha demostrado que la eficiencia de los materiales magnéticos amorfos puede igualar a la de las mejores aleaciones cristalinas y, en ocasiones, puede llegar incluso a superarla. En general, los vidrios magnéticos son aleaciones de hierro con cantidades diversas de boro, carbono o silicio. Al parecer, el límite en su eficiencia viene determinado por la anisotropía magnética que se produce en el material debido a las tensiones elásticas que aparecen durante el proceso de fabricación.

La "dulzura" magnética y la elevada resistividad de las aleaciones vítreas son propiedades que respaldan su utilización en la fabricación de cabezales de "lectura" y "escritura" en las grabadoras de cinta magnética y en las memorias de disco magnético. La frecuencia con que el campo se debe invertir en estos dispositivos es del orden de miles de hertz y, por tanto, las oportunas pérdidas se podrían reducir de forma considerable al utilizar aleaciones amorfas. Como es natural, en este contexto lo verdaderamente importante no es la conservación de energía sino la extracción de una señal cuyo nivel sea el máximo posible.

Las denominadas memorias de burbujas magnéticas constituyen una aplicación muy interesante de las láminas metálicas amorfas; en este caso, la isotropía natural de dichos materiales resulta inconveniente. Las burbujas magnéticas son dominios magnéticos de forma cilíndrica que se pueden crear en una lámina delgada en una forma tal que su eje de magnetización preferente es perpendicular al plano de la lámina. Si el material en cuestión se imanta de forma que el polo norte esté en la cara superior de la lámina, cada una de las burbujas se podrá considerar como un dominio aislado en el que los extremos norte se encontrarán orientados hacia abajo. La presencia o ausencia de una burbuja representa un bit de información. En los dispositivos de memoria existentes en la actualidad, el diámetro de las burbujas magnéticas es del orden de una micra o algo mayor. Las burbujas más pequeñas que se han llegado a observar en los materiales cristalinos son del orden de 0,5 micras.

El material utilizado corrientemente en la preparación de memorias de burbujas magnéticas es el granate sintético. Constituyó una verdadera sorpresa el encontrar que tales burbujas se podían crear también en láminas delgadas de aleaciones amorfas de tierras raras y metales de transición. El descubrimiento realizado por J. J. Cuomo, R. J. Gambino y uno de los autores de este artículo (Chaudhari) fue sorprendente debido al hecho de que estas burbujas se forman tan sólo cuando existe una anisotropía magnética que, en general, no se presenta en los vidrios metálicos. Posteriormente, se ha puesto de manifiesto la posibilidad de producir dicha anisotropía sometiendo las láminas a un campo o fuerza no isótropos, a una temperatura lo suficientemente elevada como para permitir una redistribución local de los átomos.

Las burbujas más pequeñas que se han observado en láminas delgadas de materiales amorfos son considerablemente menores que las que se observan en los cristales de granate: su tamaño es del orden de 0,1 micras. En principio, la reducción del diámetro de la burbuja en un factor de cinco puede permitir que la densidad del almacenamiento de información sea 25 veces mayor. Por otra parte, las correspondientes láminas se pueden depositar sobre toda una serie de soportes diferentes y su longitud puede ser tan larga como se desee. Por todas estas razones, los dispositivos de burbujas magnéticas fabricados con vidrios metálicos podrían reducir apreciablemente el coste por cada bit almacenado.

Para terminar, vamos a referirnos a continuación a otra posible aplicación de estos materiales. Aunque la resistividad de los vidrios metálicos suele ser muy elevada, algunos de ellos se pueden convertir en semiconductores, perdiendo toda su resistencia, para temperaturas próximas al cero absoluto. Este comportamiento es posible por el hecho de que el mecanismo de la conducción ordinaria y el mecanismo de la superconductividad son bastante diferentes. Sin embargo, la elevada resistividad normal de estos materiales influye apreciablemente sobre las propiedades de las aleaciones superconductoras. Cuando un material se convierte en superconductor, persisten en él ciertas regiones de conductividad normal, a las que se conoce con el nombre de vórtices o remolinos. El tamaño de los vórtices resulta determinado en parte por la resistividad del material; para los metales amorfos, los vórtices son extraordinariamente pequeños, del orden de 0,005 a 0,01 micras. Los vórtices de los materiales amorfos poseen una excepcional movilidad. En los sólidos cristalinos, los vórtices tienden a quedar atrapados en los bordes de los granos; pero, evidentemente, dichos granos no existen en los vidrios.

El pequeño tamaño de los vórtices debería hacer posible el hecho de que los superconductores amorfos fueran excepcionalmente tolerantes a los campos magnéticos. Para todo superconductor existe un valor crítico de la intensidad del campo magnético para el cual la superconductividad se anula y el material recupera su modo normal de conducción. En principio, cabe esperar que el campo magnético crítico sea mayor en el caso de los superconductores vítreos que en los cristalinos. Por esta razón, las aleaciones podrían ser los materiales adecuados para fabricar los bobinados de los imanes superconductores. Sin embargo, en este caso, la movilidad de los vórtices constituiría un factor negativo, en razón de que su movimiento supondría una disipación de energía. Probablemente, esta movilidad se podría reducir cristalizando parcialmente las oportunas láminas metálicas delgadas o introduciendo ciertas inhomogeneidades en alguna otra forma.

La elevada movilidad de los vórtices puede jugar un papel esencial en otra aplicación de los vidrios superconductores. Del mismo modo en que la información se puede almacenar en una serie de burbujas magnéticas, también puede recogerse en los vórtices de una lámina superconductora. De aquí que podamos pensar en la posibilidad de producir una nueva tecnología de memorias de ordenador basada en estos materiales. Dado que el tamaño de los vórtices es al menos 10 veces menor que el de las burbujas magnéticas más pequeñas, la cantidad de información que se podría almacenar por unidad de superficie sería por lo menos 100 veces mayor.

En general, los vidrios metálicos no son distintos en su composición química respecto a los materiales ordinarios; en ambos casos, los átomos presentes y sus relaciones son análogos. Lo que diferencia a estos materiales es la forma en que dichos átomos están dispuestos y enlazados. Aunque tal diferencia es meramente geométrica o topológica, puede tener una influencia enorme en las propiedades de dichos materiales. La naturaleza exacta de la correspondiente disposición atómica todavía no se puede considerar del todo resuelta; pero se conoce lo suficiente como para hacer posible la utilización de todas las propiedades peculiares a las que dicha estructura da lugar.

Estructura del universo primitivo

La estructura en gran escala del universo que contemplamos es regular dentro de un uno por mil. Hay indicaciones de que lo ha sido desde 10^{-35} segundos después del comienzo de la gran explosión

John D. Barrow y Joseph Silk

Se denomina principio cosmológico a la vigorosa idea de que el universo es homogéneo e isótropo. En otras palabras, los caracteres en gran escala del universo tendrían el mismo aspecto para un observador en cualquier galaxia independientemente de la dirección en que mirase. El principio cosmológico, confirmado por abundantes pruebas observacionales y experimentales, está profundamente enraizado en la física y la filosofía natural. ¿Cómo adquirió el universo su estructura uniforme en gran escala? O bien fue siempre básicamente así, o bien era altamente irregular y caótico tras la gran explosión y ha evolucionado hasta su presente forma por acción de ciertos mecanismos de suavizado y calentamiento. De acuerdo con la última posibilidad, llamada cosmología caótica, los mecanismos de suavizado y calentamiento darían lugar al actual universo regular independientemente del grado de irregularidad inicial. Por tanto, las teorías cosmológicas caóticas eliminan el incómodo problema de tener que conocer las condiciones iniciales del universo.

Por atractiva que sea la eliminación del problema, tales teorías pueden tener un fatal defecto. Creemos que los mecanismos propuestos de suavizado y calentamiento generarían irreversiblemente más energía térmica de la que parece existir en el universo de hoy. En consecuencia, participamos de la opinión que sostiene que el universo tenía sólo un grado infinitesimal de irregularidad en el momento de su creación. Seguimos sin saber qué sucedió en el preciso momento de la creación, porque los extraños principios físicos propios de las inmensas densidades y temperaturas de ese instante enmascaran la estructura inicial del universo. La materia se comporta de un modo que da pocas pistas sobre el aspecto del universo en los primeros 10^{-35} segundos de su existencia.

El principio cosmológico recibe apoyo observacional por el hecho de estar el universo experimentando una expansión en la que cada cúmulo de galaxias se está alejando a gran velocidad de todos los demás. En 1923, Edwin P. Hubble descubrió que la velocidad de expansión aumentaba con las distancia del observador. Detectó el movimiento de alejamiento de las galaxias distantes midiendo sus espectros ópticos. La longitud de onda a la cual la radiación electromagnética alcanza la Tierra aumenta como consecuencia de la velocidad de alejamiento del objeto respecto al observador. Se trata del fenómeno, bien conocido, de corrimiento hacia el rojo, así llamado porque si la radiación del objeto que se aleja está en la región visible del espectro, se vuelve más roja.

La cuantía del corrimiento hacia el rojo se da mediante una cifra, que corresponde al incremento relativo de la longitud de onda de la radiación recibida. Por ejemplo, las galaxias que están a una distancia de veinte millones de años-luz (entre las más próximas a nuestra galaxia) tienen un corrimiento hacia el rojo de 0,001, y las galaxias que están a diez mil millones de años-luz (entre las más lejanas) tienen un corrimiento hacia el rojo de 0,75. Midiendo el corrimiento hacia el rojo, Hubble pudo calcular las velocidades de alejamiento de las galaxias distantes y, consiguientemente, la velocidad de expansión del universo.

La naturaleza de la expansión se puede entender mediante una analogía visual clásica: asemejando el universo a un globo esférico con puntos pintados en su superficie, cada uno de los cuales representa una galaxia. Conforme el globo se infla, la distancia entre dos puntos cualesquiera (medida sobre la superficie del globo) aumenta a una velocidad proporcional a la distancia entre ellos. Un observador situado en cualquiera de los puntos vería todos los demás alejándose de él uniformemente en todas las direcciones; ningún observador ocuparía una posición privilegiada. Para decirlo de otra manera, la expansión no tiene centro.

No se sabe si la expansión del universo continuará por siempre o si algún día las galaxias cesarán en su mutuo alejamiento, comenzando a moverse en sentido contrario y, con el tiempo, llegando a chocar. Cualquiera de las dos posibilidades concuerda con la teoría cosmológica predominante, la cual sostiene que el universo comenzó con una explosión a partir de un estado superdenso. El tipo de expansión está determinado por la geometría del espacio-tiempo del universo. La expansión infinita implica un universo "abierto"; la expansión finita seguida por el colapso significa un universo "cerrado". El estado intermedio crítico, defendido por Albert Einstein y Willem de Sitter en 1932, es aquel en que el universo tiene la energía mínima necesaria para superar la influencia deceleradora de la gravedad y expandirse por siempre hasta el infinito. Es difícil determinar si el universo es abierto o cerrado porque la energía de expansión está próxima al valor crítico. Este punto es tema de continua investigación en astronomía.

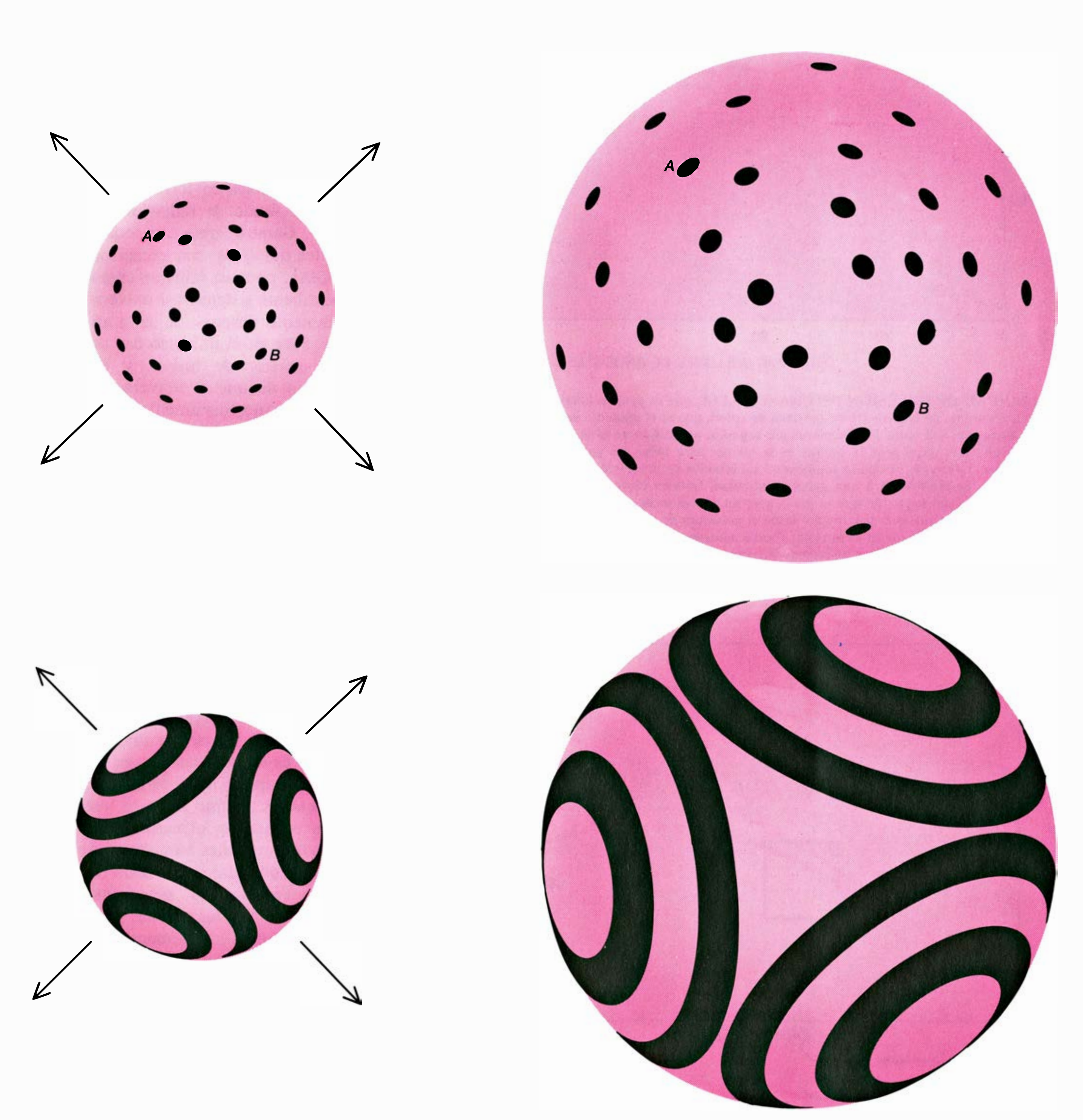
El universo es homogéneo e isótropo no sólo en su velocidad de expansión, sino también en la distribución de los objetos que lo constituyen. Hubble contó el número de galaxias distantes en cuadrantes separados del cielo y en distintos volúmenes del espacio. Halló que cuanto mayor es el volumen, tantas más galaxias contiene. Además, la distribución de galaxias apenas variaba con la dirección. Exploraciones más recientes han investigado la uniformidad de distribución de las galaxias en el universo hasta distancias mucho más grandes. Por ejemplo, cuando se comparan regiones distantes con un radio de un gigaparsec, o 3×10^9 años luz, sus poblaciones de objetos radioemisores (galaxias y quasars) resultan ser iguales dentro de un uno por cien.

La indicación de isotropía más convincente proviene de la radiación de fondo en microondas, u ondas de radio con longitudes de onda del orden de un

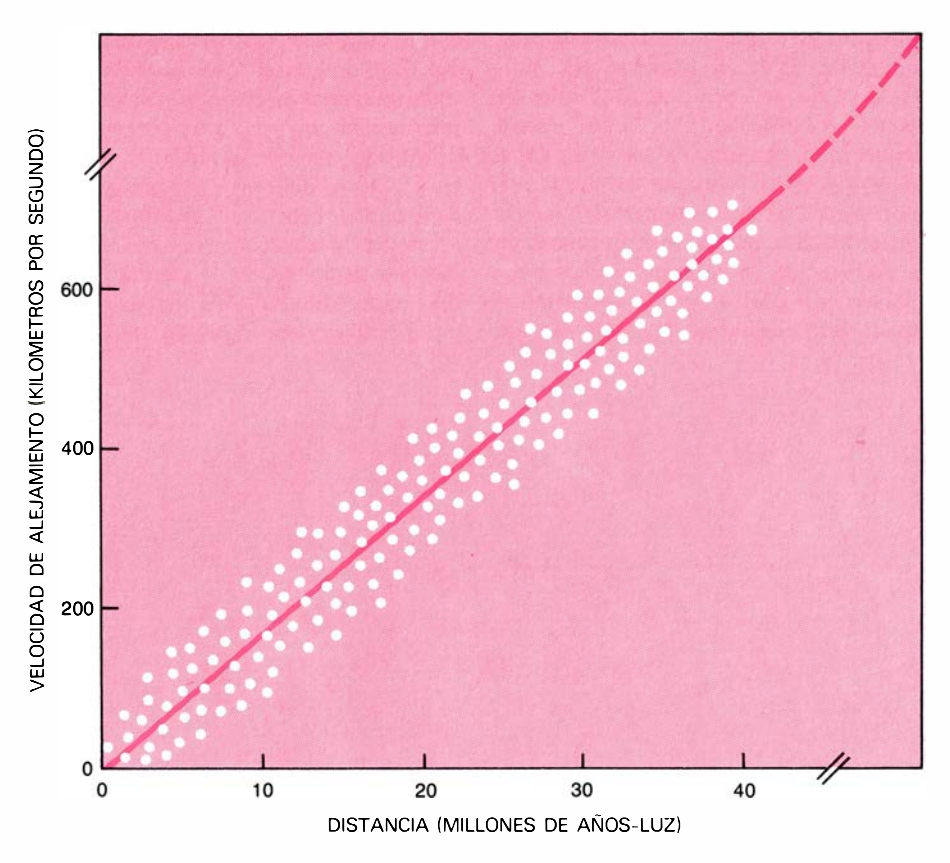
milímetro, que parece invadir la totalidad del universo. La radiación fue descubierta en 1965 por Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, de los laboratorios Bell. Los mapas de la radiación en microondas en el cielo basados en mediciones realizadas con antenas transportadas a grandes altitudes por aviones y globos muestran que la intensidad de la radiación es isotrópica con un error inferior a una parte en 1000.

Menos fácil resulta expresar cuantitativamente la homogeneidad del universo. Este es, por supuesto, fuertemente heterogéneo a una escala pequeña, tal como la del sistema solar o nuestra galaxia. A mayor escala, la homogeneidad de su contenido de materia viene indicada por la homogeneidad de la distribución de galaxias visibles y radiofuentes y también por la uniformidad de un fondo universal de rayos X. A la escala de la totalidad del universo observable, el indicador más sensible de la homogeneidad es el fondo universal de microondas, que es homogéneo dentro de un uno por mil. La medición, sin embargo, no es definitiva porque la radiación podría haber sido redifundida por el medio intergaláctico en su trayecto hasta el sistema solar, y con ello se podría haber suavizado su variabilidad.

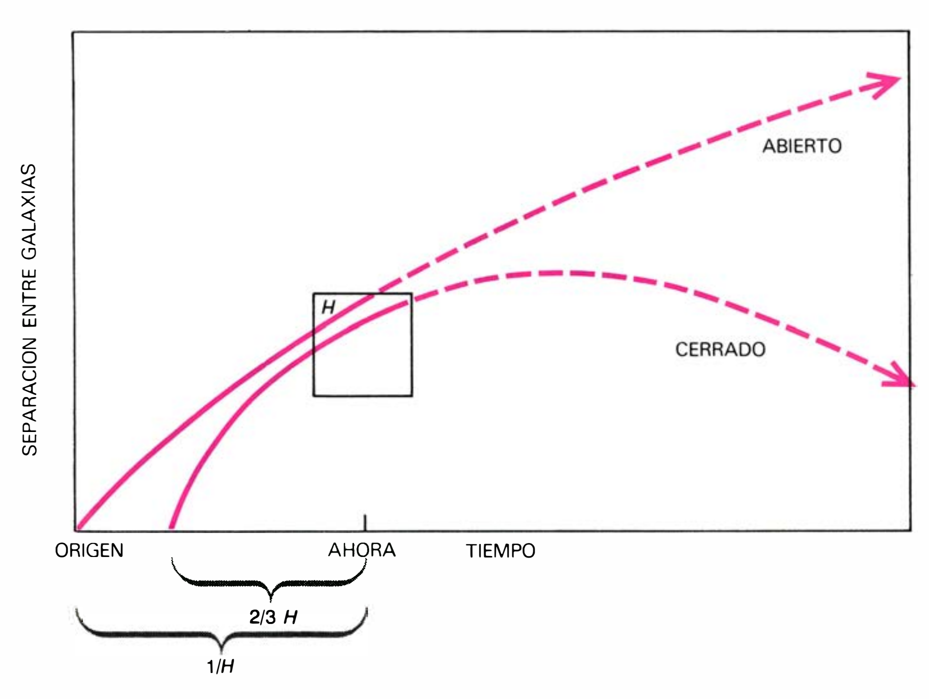
La radiación de fondo en microondas



TRADICIONAL MODELO GLOBULAR del universo, que sugiere la manera cómo el universo real se expande en todas direcciones. Cada punto sobre la superficie del globo en la parte superior izquierda corresponde a una galaxia. Cuando el globo se hincha (*arriba, derecha*), la distancia entre dos puntos cualesquiera sobre su superficie aumenta a un ritmo proporcional a su distancia. Cualquiera que sea el punto elegido (por ejemplo *A* o *B*), todos los restantes se alejan de él uniformemente en todas las direcciones en la superficie. Esto demuestra que la expansión no tiene centro. Al hincharse el globo, la distribución geométrica de los puntos no cambia. Un globo con un dibujo pintado en su superficie (*ilustración inferior, a la izquierda*) exhibirá el mismo dibujo cuando esté inflado (*figura inferior, a la derecha*). La expansión del universo real es homogénea con un error inferior al uno por mil.



VELOCIDAD DE RECESION DE UNA GALAXIA, que es proporcional a su distancia al observador. La constante de Hubble (*línea continua en color*), que es el aumento de la velocidad de alejamiento con la distancia, vale unos 17 kilómetros por segundo por millón de años-luz. (La constante de Hubble sólo es constante en el sentido de que es la misma para todas las galaxias hoy día, pero variará a medida que el universo se siga expandiendo.) La relación de la velocidad a la distancia puede diferir de la constante de Hubble para una galaxia individual (*puntos blancos*) que tiene una velocidad orbital como resultado del hecho de que la galaxia es un miembro de un cúmulo. Las velocidades de alejamiento probablemente han disminuido desde el momento de la gran explosión a causa de la atracción gravitatoria de la materia en expansión. Consecuentemente, la relación de la velocidad a la distancia pudo haber sido más grande a distancias extremas (*curva de trazos en color, en el extremo superior*).



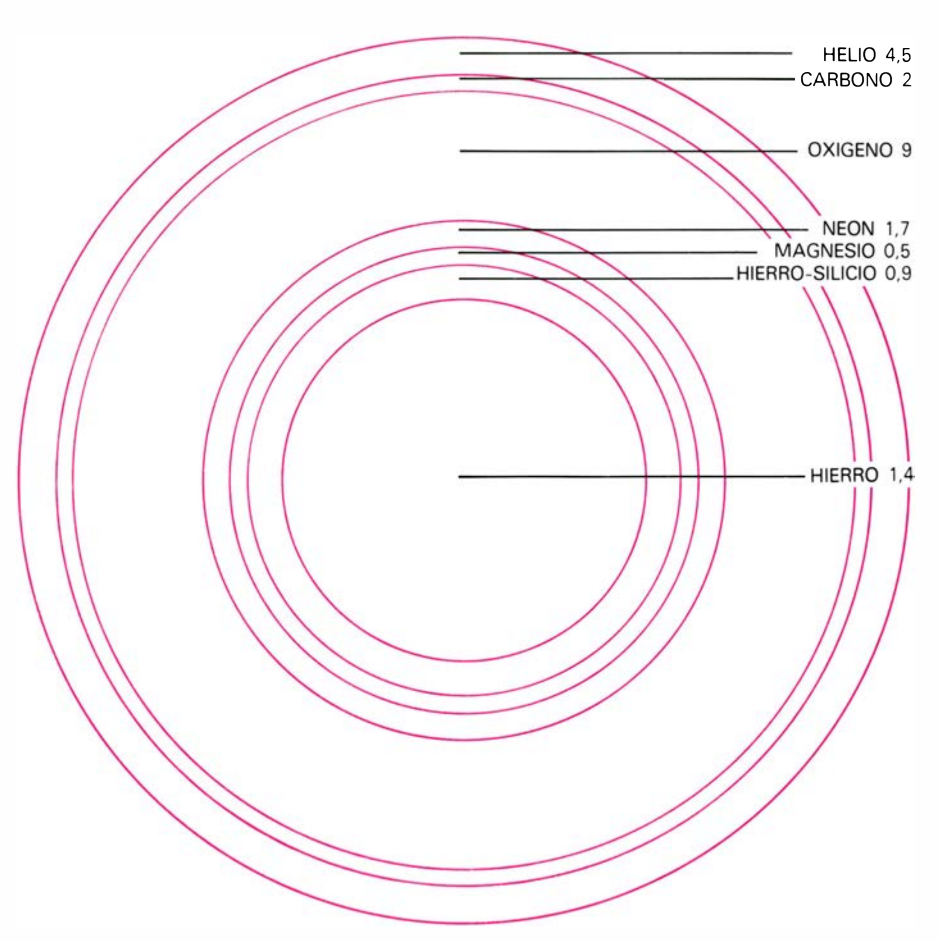
MODELOS DE EVOLUCION COSMICA: indican cómo cambian con el tiempo las velocidades de separación entre las galaxias. Si el universo continuase siempre en expansión, su edad sería el tiempo de Hubble: el inverso de la constante de Hubble (*H*). Un universo en expansión infinita se llama universo abierto (*flecha superior*). Por otra parte, si al transcurrir el tiempo el universo cesa de expandirse y comienza a contraerse, su edad no alcanza 2/3 *H*. Tal universo se considera cerrado.

establece mucho más que la validez del principio cosmológico para la historia reciente del universo. El espectro de la radiación es idéntico al que generaría un cuerpo negro (o emisor perfecto de radiación) a una temperatura de 2,9 grados Kelvin (2,9 grados Celsius por encima del cero absoluto). La radiación, hoy, apenas es un débil vislumbre, pero da testimonio de un agitado pasado. Para que la radiación tenga el espectro de un cuerpo negro, el universo primitivo hubo de atravesar por una fase caliente y densa. Una de las más notables predicciones de la moderna cosmología fue la sugerencia hecha por George Gamow (y sus colaboradores Ralph A. Alpher y Robert Herman) de que los residuos de la gran explosión deberían ser todavía visibles en forma de un omnipresente fondo de radiación de cuerpo negro. Gamow creía que todos los elementos químicos, con excepción del hidrógeno, podrían haberse creado en la fase caliente y densa del universo inmediatamente después de la gran explosión. Para él, el universo era un gigantesco reactor de fusión, y el simple requisito de que el universo no debía consumir inmediatamente todo su hidrógeno para producir helio condujo a la predicción consiguiente de que la radiación, aunque grandemente enfriada y diluida por la expansión, debería estar aún presente con una temperatura de unos cinco grados Kelvin.

Hoy día se sabe que el universo no permaneció denso y caliente durante tiempo suficiente para que los elementos pesados, tales como el carbono y el hierro, se formasen en reacciones sucesivas a partir de los primitivos protones y neutrones. Asimismo, se sabe que los elementos pesados se sintetizan en el interior de las estrellas. Las estrellas más antiguas parecen tener déficit de elementos pesados, lo que significa que, en la época en que se formaron, su entorno era pobre en tales elementos. Sin embargo, la abundancia de helio en las estrellas antiguas es esencialmente la misma que la de las estrellas mucho más jóvenes ricas en elementos pesados. Además, muchas clases de galaxias comparten una misma abundancia aproximada de helio. La uniforme distribución universal del helio, que sólo sigue en abundancia cósmica al hidrógeno, indica que fue principalmente creado no en los interiores estelares, sino en el caliente período posterior a la gran explosión, tal como Gamow lo concebía. El general acuerdo entre su predicción de una radiación de cuerpo negro a cinco grados K y el descubrimiento por Penzias y Wilson de la radiación de 2,9 K,

así como la afinada predicción de la abundancia del primitivo helio, constituyen los argumentos más poderosos a favor de una gran explosión caliente.

A partir de los datos de la radiación de fondo en microondas, los teóricos pudieron calcular una nueva magnitud fundamental: la relación del número de fotones (las partículas sin masa que constituyen la radiación electromagnética) en el universo al número de nucleones (protones y neutrones con masa). La relación es de unos 10^8 fotones por cada nucleón, y es una medida de la entropía térmica media asociada a cada nucleón. La entropía, usualmente representada por la letra S, se define como el número que indica cuántos estados son posibles en un sistema. Dicho de otra manera, la entropía es una medida del grado de caos o desorden. Un líquido es un ejemplo de un sistema de alta entropía porque sus átomos pueden distribuirse de una enorme variedad de maneras; un retículo cristalino es un ejemplo de un sistema de entropía más baja porque sus átomos están dispuestos de un modo altamente ordenado. La relación de la densidad de fotones a la densidad de nucleones promediada para un gran volumen del universo es una medida de la entropía media porque los fotones constituyen los estados más desordenados de energía térmica y los nucleones, los estados más ordenados. De aquí que las abundancias relativas de esas dos clases de estados extremos sean una medida de la entropía media.



LOS ELEMENTOS MAS PESADOS QUE EL HELIO no fueron sintetizados en la gran explosión, sino en el interior de las estrellas. Si una estrella tiene una masa de más de 20 veces la del Sol, es inestable y explota como una supernova, dispersando elementos pesados en el espacio. A medida que tal estrella se contrae bajo la mutua atracción gravitatoria de sus componentes, la presión y la temperatura en su interior crecen hasta que las reacciones termonucleares transmutan hidrógeno en helio. Cuando la mayor parte del hidrógeno en el núcleo de la estrella se ha transmutado en helio, aquélla se contrae todavía más hasta que la temperatura en su interior se hace suficiente para transmutar parte del helio en carbono. A medida que la contracción de la estrella continúa, su temperatura sube hasta que el carbono empieza a transmutarse en elementos más pesados. En cada fase, la estrella deja atrás una capa de material más ligero. Las masas de estas capas están expresadas en masas solares. En la estrella aquí representada, prácticamente todo el hidrógeno se ha transmutado en otros elementos más pesados.

De acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, la entropía total del universo crece continuamente a medida que transcurre el tiempo. Esto significa que en el instante de la gran explosión S era inferior a 10^8. La expansión isotrópica del universo no disipó mucho calor, de modo que cualquier aumento de S debe haber sido causado por otro mecanismo. Una entropía de 10^8 es muy grande comparada con la entropía de alrededor de 1 que muestran los sistemas en el entorno terrestre. Esto significa que el universo en conjunto es un lugar relativamente caliente. La primera reacción de un físico ante un sistema con un alto grado de regularidad es suponer que en la historia del sistema se ha disipado mucha energía térmica, siendo el calor y la regularidad las consecuencias de procesos friccionales de suavizado. Trataremos de mostrar, sin embargo, que para el universo esta explicación es probablemente incorrecta.

Extrapolando hacia atrás, desde el universo en expansión del día presente hasta la época anterior a la formación de las galaxias, los cosmólogos han seguido la pista del origen del universo hasta encontrar una singularidad: un estado de densidad aparentemente infinita. La singularidad representa el origen del espacio y tiempo, quizá hace diez mil millones de años. Antes de esa época, las leyes de la física conocidas hoy no eran aplicables. ¿Da esto cuenta del conocimiento de los físicos, o de su ignorancia? Antes de 1965, los cosmólogos debatían el significado físico de esta singularidad. Algunos teóricos opinaban que podría ser una manifestación espúrea del sistema particular de coordenadas elegido para describir la dinámica de la expansión del universo, manifestación semejante a la singularidad en geografía. En un globo terrestre hay una singularidad de las coordenadas en los polos Norte y Sur, en los que la rejilla de la cuadrícula de longitud y latitud se anula al cortarse los meridianos del globo. Sin embargo, la construcción del globo no sufre alteración física alguna en los polos.

Desde 1965, varios teóricos han mostrado independientemente que la singularidad cosmológica no es el resultado de un sistema de coordenadas inadecuadamente elegido. Por el contrario, la singularidad parece ser general, físicamente real y consecuencia inevitable del hecho de que la gravedad es atractiva y actúa sin discriminación sobre todo, fotones incluidos. La singularidad estaba probablemente caracterizada por infinitas densidad y curvatura, aunque todo lo que se sabe con certeza es que un observador material moviéndose hacia atrás en el pasado experimentaría un brusco y desconcertante final de su viaje a través del espacio-tiempo cuando la encontrase. Le sería imposible viajar más lejos porque las leyes de la física requieren que el universo tenga un límite en el espacio-tiempo. (El viajero, sin embargo, no experimentaría necesariamente la gran explosión con sus densidad y temperatura infinitas.)

La singularidad cosmológica es seme-

jante a la singularidad, en el horizonte de los sucesos, de un agujero negro, superficie hipotética en la que la materia y los rayos de luz están confinados por la gravedad. Nada puede salir de un agujero negro porque la velocidad necesaria para escapar de las garras de su gravedad es superior a la velocidad de la luz, que las leyes de la física no permiten sea excedida. Se ha demostrado que un desgraciado astronauta que cayera libremente en un agujero negro alcanzaría una singularidad física dentro de un tiempo limitado (considerando el tiempo que mediría su propio reloj). La singularidad sería invisible para los observadores externos, toda vez que caería dentro del horizonte de sucesos del agujero negro.

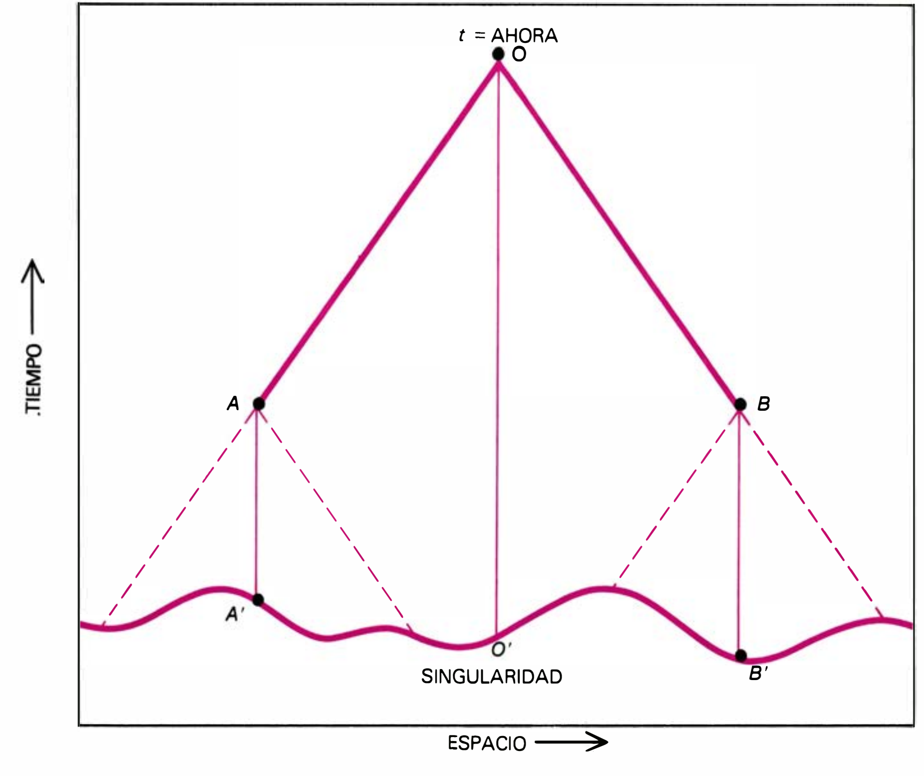
Ahora bien, ya que los fotones sienten la atracción de la gravedad, es posible determinar si, en algún temprano momento de la historia del universo, los fotones que constituyen actualmente la radiación de fondo en microondas pudieron haber ejercido una atracción gravitatoria suficiente para crear una región encerrada análoga a un agujero negro. Dentro de esa región existiría una singularidad cosmológica, que el físico define como el comienzo del universo.

El hecho de que la expansión universal se originase en una singularidad tiene consecuencias de largo alcance en relación con los puntos del universo entre los que hay influencia causal mutua. Como ninguna señal se puede mover con mayor velocidad que la de la luz, un observador puede ser afectado solamente por aquellos sucesos desde los cuales un fotón haya tenido tiempo de alcanzarlo desde el comienzo del universo. De tales sucesos se dice que están situados en el horizonte del observador. Considérense dos puntos con una separación espacial x en el comienzo del tiempo. Antes del intervalo de tiempo que tarda la luz en ir de uno a otro (x/c, donde c es la velocidad de la luz), los puntos no "se verán" entre sí, ninguno de ellos "sabrá" de la existencia del otro ni serán capaces de afectarse mutuamente de manera alguna. En general, las regiones del universo con una separación espacial mayor que ct no sabrán cada una de la existencia de la otra hasta que haya transcurrido un tiempo t. Lo que ello significa es que las regiones del fondo isótropo de microondas en diferentes direcciones del cielo (por ejemplo, a más de 30 grados de distancia) nunca pudieron haber ejercido influencia causal mutua en ningún momento del pasado. Esto crea una paradoja: ¿Cómo puede ser que regiones causalmente disjuntas del primitivo universo hayan llegado hoy a tener la misma temperatura y velocidad de expansión dentro de un uno por mil?

Un nuevo recodo en el laberinto del origen de la radiación uniforme de fondo surge con el hecho siguiente: aunque el universo presenta gran regularidad a la escala de varias decenas de millones de años-luz, muestra a escalas menores algunas heterogeneidades espectaculares en la forma de galaxias y cúmulos de galaxias. La intensidad del campo gravitatorio ejercido por la mayor de esas heterogeneidades sugiere que sus antiguos precursores deberían haber creado una anisotropía en la radiación de fondo en microondas con una amplitud angular de algunos grados. Los astrónomos observadores están en la actualidad tratando de localizar una de tales anisotropías. También debería haber anisotropía como consecuencia de antiguas disparidades direccionales en la velocidad universal de expansión. No está claro cuáles son los mecanismos físicos que han suavizado tales irregularidades conduciendo al universo estructurado de hoy.

Lo que los cosmólogos están tratando de explicar es tanto la entropía como la estructura en gran escala del universo, que parecen haber existido cuando había transcurrido menos de un minuto desde su formación. Tales intervalos de tiempo quedan mejor definidos, sin embargo, no en unidades de tiempo tales como los minutos o los años, que quedan sometidos a correcciones a medida que se afina en la precisión de las medidas astronómicas, sino en unidades de corrimiento hacia el rojo, que expresa la cuantía en que el universo estaba comprimido respecto a su actual tamaño.

Por un lado, hay cosmólogos "caóticos" que mantienen, al igual que los biólogos, que las propiedades del universo son el resultado de procesos de evolución. Han tratado de demostrar que una especie de selección natural gravitatoria podría dar lugar a la actual estructura en gran escala como inevitable resultado de procesos de suavizado físico y calentamiento que han venido actuando desde la "gran explosión". Si se pudiera demostrar que, cualesquiera que fuesen las condiciones iniciales, se habría llegado a la actual estructura, habría quedado es-

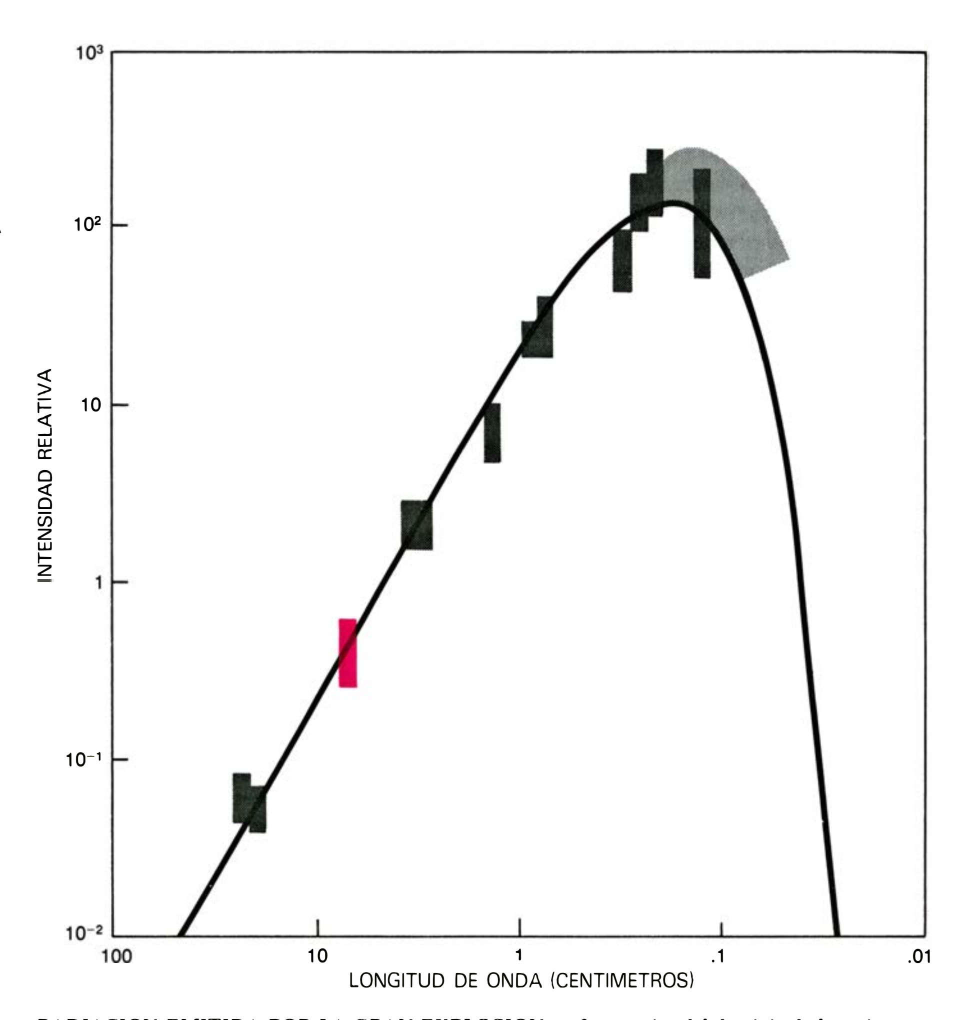


POR "HORIZONTE" DE UN OBSERVADOR se entiende la parte del universo compuesta de sucesos que pueden afectarle causalmente. Como no hay manera de transmitir información a velocidad superior a la de la luz, en un observador sólo pueden influir aquellos sucesos desde los cuales la luz haya podido llegar a él en un tiempo igual o menor que el transcurrido desde la gran explosión. Aquí *O'* corresponde a la singularidad con la cual comenzó el universo y *O* corresponde al tiempo actual. El cono bajo *O* representa el horizonte de sucesos en la Tierra. A medida que el universo continúa evolucionando, la Tierra se va alejando a lo largo del eje de tiempos, y consiguientemente el cono se hace mayor. La singularidad puede haber sido suficientemente complicada para que diferentes partes del universo comenzaran su expansión en distintos instantes. Por ejemplo, la gran explosión podría haber tenido lugar en *B'* antes que en *A'*. Hay regiones del universo (*A*, *B*) que, a juzgar por su radiación recibida en la Tierra, tienen la misma temperatura y velocidad de expansión, dentro de un uno por mil. Sin embargo, esas regiones nunca han estado causalmente relacionadas en ningún momento de la historia del universo. Esto da lugar a una paradoja: ¿Cómo pueden las dos regiones ser tan semejantes?

tablecida la unicidad del universo tanto en teoría como en la realidad.

Por otro lado, hay cosmólogos "reposados" que apelan en gran parte a las condiciones iniciales para explicar la actual estructura del universo. Suponen que, cuando el universo se creó en la singularidad, tenía ciertas características estructurales definidas y preferidas por razones, digamos, de cohesión, estabilidad o unicidad. Esto significa que los procesos gravitatorios de evolución no intervinieron para dar forma a la configuración general del universo, sino solamente para moldear las subestructuras tales como las galaxias, las estrellas y los planetas. Una gran parte del trabajo teórico en cosmología, a lo largo del último decenio, se ha centrado en hallar la manera de distinguir entre las dos diferentes cosmologías. Dedicaremos a este trabajo el resto de nuestra explicación.

Se cree en la actualidad que, a temperaturas ordinarias, todos los fenómenos naturales están regidos por cuatro fuerzas fundamentales: la fuerza gravitatoria, la fuerza electromagnética, la interacción débil y la interacción fuerte (o nuclear). Estas fuerzas, junto con un pequeño número de datos adicionales tales como la masa de las partículas, determinan las características estructurales del universo. A medida que se recorre la historia del universo en sentido inverso, desde el presente hasta la singularidad con corrimiento hacia el rojo igual a infinito, hace unos diez mil millones de años, se encuentra que cada una de las cuatro fuerzas fundamentales ha predominado en algún momento sobre las demás. Hoy es la fuerza gravitatoria la que rige la dinámica de la expansión en gran escala. Aunque la atracción gravitatoria de dos protones es 10^{40} veces más débil que su repulsión electromagnética, la gravedad se hace cada vez más importante en un sistema constituido por un enorme número de partículas, tal como es el universo. En el universo, el número de partículas cargadas positivamente debe ser igual al número de las cargadas negativamente, de modo que en conjunto las interacciones electromagnéticas de atracción y repulsión se anulan y no ejercen fuerzas importantes de largo alcance sobre grandes regiones. Por el contrario, al ser la gravedad solamente atractiva, desempeña un papel muy importante en sistemas de gran masa. La influencia de la fuerza gravitatoria, que tiene un alcance infinito y actúa sobre los fotones de radiación lo mismo que sobre las partículas materiales, determina el tamaño de los mayores objetos de la naturaleza, tales como los planetas, estrellas, galaxias y cúmulos.



RADIACION EMITIDA POR LA GRAN EXPLOSION en frecuencias del dominio de las microondas. Fue detectada en 1965 por Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, de los Laboratorios Bell, galardonados con el Nobel. Sus mediciones (*región en color*) muestran que el espectro de la radiación es el espectro de un cuerpo negro a 2,9 grados Kelvin (2,9 grados Celsius por encima del cero absoluto). La radiación es uniforme, independientemente de la dirección, con un error inferior al uno por mil.

Si casualmente una región local del primitivo universo hubiera tenido una densidad mayor que la de las regiones circundantes, su gravedad habría atraído más materia que la de las regiones menos densas. A medida que se fuera contrayendo bajo la acción de su propia gravedad, habría continuado ganando en densidad y en eficacia para atraer materia. Lo que pudo comenzar como una fluctuación en un universo relativamente homogéneo habría ido incrementándose con el tiempo, a la manera de una bola de nieve, hasta convertirse en una enorme heterogeneidad. Las galaxias parecen haberse formado en tiempos equivalentes a corrimientos hacia el rojo de entre 10 y 100, y haberse reunido en cúmulos más tarde. Sin embargo, no se sabe con certeza si las galaxias se formaron a partir de fragmentos de fluctuaciones mucho mayores que se desintegraron, o si lo hicieron a partir de menores fluctuaciones que se reunieron por su mutua atracción gravitatoria.

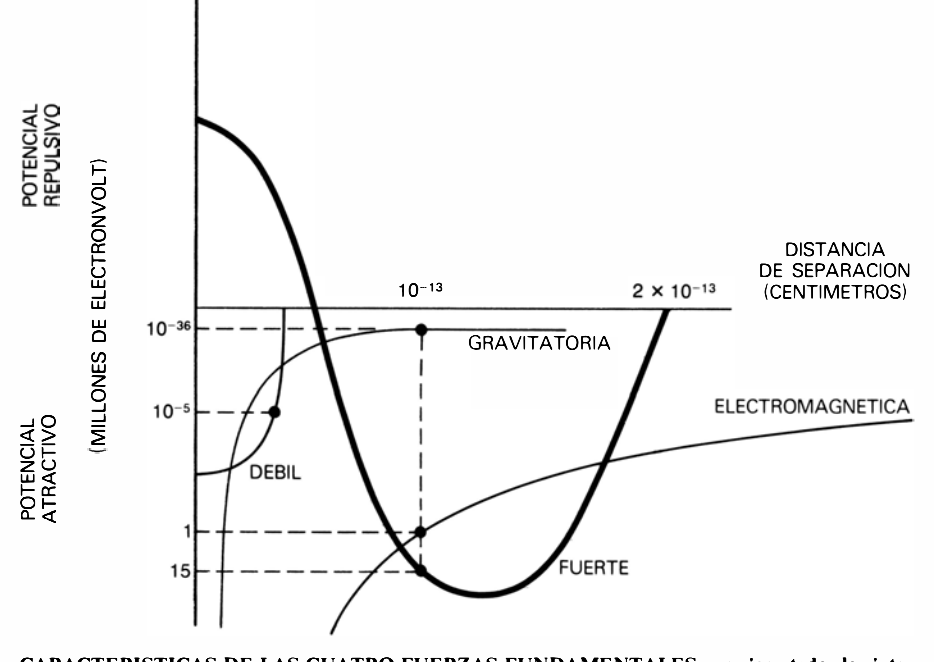
En una época equivalente a un corrimiento hacia el rojo de 1000 (aproximadamente unos 300.000 años tras la gran explosión), la presión del gas es mayor que la gravedad en una extensión equivalente a la de 100.000 soles, pero la gravedad es mucho más grande que la presión gaseosa para dimensiones mayores. Las fluctuaciones del orden de esas dimensiones mayores crecen hasta hacerse, con el tiempo, lo suficientemente grandes para colapsar y formar objetos concentrados, cubriendo un dominio de masas desde las de los cúmulos globulares de estrellas hasta las de las galaxias. En épocas equivalentes a corrimientos hacia el rojo mayores que 1000, la principal fuente de presión no es la presión gaseosa, sino la presión de la radiación térmica. En esa época, el comportamiento dinámico de las perturbaciones de densidad está determinado por la fuerza electromagnética.

Bajo esas circunstancias, los fotones forman un fluido viscoso que inhibe el movimiento de electrones y protones. Un electrón, por ejemplo, dispersará los fotones incidentes, que él detecta como impulsos eléctricos. Por la ley de la conservación de la cantidad de

movimiento, la dispersión alterará ligeramente la trayectoria del electrón. El resultado es que el electrón, encerrado en el campo de radiación por el incesante bombardeo de fotones, no puede ir a ninguna parte. Una vez que el electrón se asocia a un protón para formar un átomo de hidrógeno, sin embargo, no es ya capaz de sentir efectivamente los fotones, porque su interacción tiene lugar primordialmente con el campo eléctrico del protón. La falta de movimiento de los electrones individuales significa que las fluctuaciones de la densidad de la materia, llamadas fluctuaciones isotermas de densidad, se conservan hasta el momento en que los electrones y protones se combinan para formar átomos eléctricamente neutros. Tales átomos pueden moverse libremente a través de la radiación, de modo que el aumento de la gravedad y el colapso pueden proseguir. Las fluctuaciones isotermas de densidad empiezan a colapsar cuando adquieren una masa de más de 100.000 soles. Tales fluctuaciones se reúnen para formar galaxias.

Pueden también formarse objetos a partir de otra clase de perturbación, llamada fluctuación adiabática, en la que la materia y la radiación son perturbadas conjuntamente. Si la materia y la radiación fuesen comprimidas ligeramente en un espacio limitado, el exceso de presión crearía una especie de onda sonora. Sin embargo, lo mismo que las ondas sonoras en el aire se disipan y desaparecen con el tiempo, también lo haría la onda sonora primitiva. La longitud y masa críticas por debajo de las cuales la onda se amortiguaría completamente viene determinada por la capacidad de los fotones para escapar de la fluctuación adiabática en el tiempo transcurrido desde el comienzo del universo. Para un tiempo equivalente a un corrimiento hacia el rojo de 1000, solamente las fluctuaciones adiabáticas de mayor masa que la del tamaño observado en una galaxia masiva o un grupo de galaxias sobreviven al amortiguamiento. En otras palabras, las fluctuaciones adiabáticas menos masivas se alisan, mientras que las de mayor masa tal vez sobrevivan, crezcan y con el tiempo colapsen formando galaxias masivas y grupos de galaxias.

INTERACCION	FUENTE	CUANTO DEL CAMPO	INTENSIDAD RELATIVA	ALCANCE (CENTIMETROS)	MANIFESTACION	ENERGIA DE UNIFICACION (ELECTRONVOLT)
Electromagnética	Carga eléctrica	Fotón	10^{-12}	∞	Fuerzas atómicas y moleculares, electricidad	10^{11}
Débil	Leptones, mesones	(Bosones *W*)	10^{-14}	10^{-15}	Desintegración radiactiva beta	10^{23}
Fuerte	Bariones, mesones	Pion, Kaón	1	10^{-13}	Fuerzas nucleares	10^{28}
Gravitatoria	Energía másica	(Gravitón)	10^{-40}	∞	Dinámica de la materia en gran escala	



CARACTERISTICAS DE LAS CUATRO FUERZAS FUNDAMENTALES que rigen todas las interacciones entre materia y energía; se dan en la tabla de la parte superior. El alcance e importancia relativa de las fuerzas aparecen en el diagrama de la parte inferior. Por encima de una cierta energía, llamada energía de unificación, las fuerzas pierden su individualidad. Todas las partículas subatómicas, de las que hay más de 200 clases, responden al menos a una de esas fuerzas. Las partículas se dividen en dos amplias categorías: los hadrones (entre los que se cuentan el protón, el neutrón y el pion), que parecen tener estructura interna, y los leptones (el electrón, el muón, la partícula tau y los neutrinos asociados a cada una de ellas), que carecen de partes constituyentes. Los hadrones, además, se dividen en bariones, que finalmente degeneran en protones, y mesones, que se desintegran en leptones y fotones (cuantos de radiación electromagnética) o en parejas que constan de un protón y un antiprotón.

En resumen, esta reconstrucción de la probable evolución del primitivo universo caliente comprende dos clases de fluctuaciones de densidad, la isoterma y la adiabática, que, grosso modo, corresponden respectivamente a un cúmulo globular de estrellas o una galaxia enana y a un cúmulo de galaxias. El cuadro es indudablemente una tosca y excesiva simplificación, porque, en general, es de esperar que una heterogeneidad arbitraria conste de una mezcla de componentes adiabáticas e isotermas en proporciones variables. Además, las estructuras recién formadas podrían unirse o fragmentarse, sin dejar indicios de su identidad individual previa. A pesar de estas puntualizaciones, sería una imprudencia por parte de los cosmólogos ignorar esta simple descripción porque las masas preferidas que resultan de las dos clases de fluctuaciones son comparables a las masas de los objetos cuyo origen tratan de explicar.

En un tiempo equivalente a un corrimiento hacia el rojo de 10^{10}, cuando el universo tenía tan sólo unos segundos de edad y su temperatura era de 10^{10} grados K, los procesos físicos eran gobernados por las interacciones débiles. Estas fuerzas rigen ciertos procesos de desintegración radiactiva que afectan a un neutrón libre o a un neutrino, o partícula puntual en rotación ("spin"), sin carga y de masa despreciable. Para tiempos equivalentes a corrimientos hacia el rojo mayores que 10^{10}, la fuerza débil mantiene los protones y neutrones en equilibrio térmico: un estado estadístico en el que el número de partículas con propiedades (posición, masa, energía,

velocidad, etcétera) en un dominio especificado permanece constante porque el flujo de partículas que penetran en el dominio es igual al de las que lo abandonan. Cuando las partículas alcanzan un estado de equilibrio térmico, su comportamiento no está determinado en manera alguna por su historia, sino que queda completamente especificado por un conjunto de leyes estadísticas basadas en su temperatura. Esto significa que es innecesario hurgar en el pasado para comprender el comportamiento y las concentraciones relativas de protones y neutrones.

La fuerza débil, junto con el modelo de expansión ligado a la gran explosión, lleva a la predicción de que la abundancia de helio primitivo en el universo está comprendida entre el 25 y el 30 por ciento. Esta predicción, que ahora ha sido confirmada, ha conducido a una comprobación observacional precisa y directa de la cosmología basada en la idea de la gran explosión. Lo que el éxito de esta predicción significa es que, algunos segundos tras la gran explosión, el universo era en gran escala tan regular como lo es hoy y tenía casi la misma entropía. Los cosmólogos están tratando de determinar el grado de regularidad antes de aquel instante.

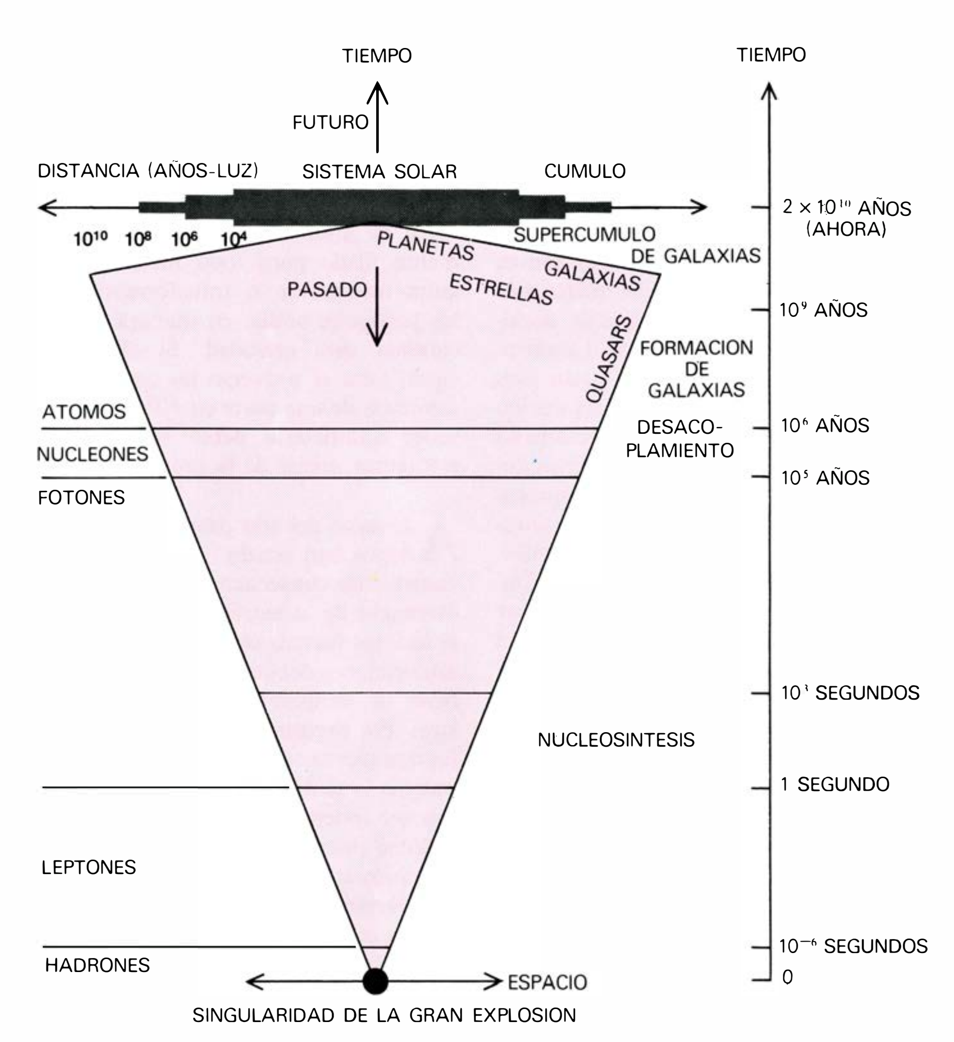


DIAGRAMA ESPACIO-TIEMPO del universo; recorre hacia atrás su historia hasta alcanzar la singularidad, aproximadamente hace unos veinte mil millones de años. La región sombreada representa el horizonte de un observador situado en la singularidad. Cada una de las fuerzas fundamentales (electromagnética, gravitacional, fuerte y débil) rigió en algún momento el comportamiento de la materia.

Para tiempos equivalentes a corrimientos hacia el rojo mayores que 10^{10}, los neutrinos y sus antipartículas (antineutrinos) desempeñan un importante papel. Hoy día estas partículas resultan muy escurridizas porque casi nunca interaccionan con nada en el enrarecido medio del presente universo. Sin embargo, cuando el universo tenía una edad algo inferior a un segundo, la materia y la radiación eran tan densas que los neutrinos interaccionaban con ellas rápida y fuertemente. En el instante equivalente a un corrimiento hacia el rojo de 10^{10}, un neutrino típico atravesaba una considerable extensión del universo antes de chocar con otra partícula. Esto significa que los neutrinos podían transportar de un modo eficaz energía y cantidad de movimiento a lo largo de distancias extremadamente grandes, cosa que realizaban absorbiendo energía en las regiones de alta energía del universo y transfiriéndola, mediante choques ocasionales, a las regiones de baja energía. Resultado de ello, los neutrinos actúan en el sentido de uniformar las irregularidades en la distribución de materia que pudieran haber sido creadas por diferencias direccionales en la expansión general del universo primitivo.

La posibilidad del suavizado mediante procesos de transporte efectuados por los neutrinos fue sugerida en 1967 por Charles W. Misner, de la Universidad de Maryland, en la esperanza de que tales procesos pudieran eliminar una multitud de irregularidades asociadas a la singularidad inicial de un universo caótico. Esta esperanza ha naufragado ahora al advertirse que, si la expansión inicial hubiera sido suficientemente asimétrica, el universo se habría expandido tan rápidamente que no habría habido tiempo suficiente para que los neutrinos chocasen con otras partículas. En otras palabras, un universo altamente anisótropo podría haber quedado así. Parece que el transporte por neutrinos y otros procesos uniformadores sólo podrían eliminar anisotropías por debajo de un cierto nivel. Independientemente de lo eficaz que se supusiera un proceso de suavizado, siempre sería posible imaginar un modelo de universo que quedaría en cualquier caso mucho más irregular de lo que el universo de hoy día es realmente. Esta consecuencia de la interacción débil no puede satisfacer el postulado central de la cosmología caótica: la evolución hasta el universo regular de hoy día a partir de cualquier estado inicial con no importa qué grado de irregularidad.

Quizás el universo homogéneo podría ser el resultado de procesos de suavizado más complicados, tales como el ingenioso "universo batidora" de Misner, en el cual la materia se mezclaría periódicamente gracias a explosiones que se expandirían con la velocidad de la luz, primero en una dirección y luego en otra. Este es un proceso exótico y complicado, desarrollado basándose en la teoría general de la relatividad. Sin embargo, la probabilidad de tales explosiones parece ser infinitesimal. En efecto, las condiciones requeridas para tal tipo de mezcla son casi tan especiales como las que se requerirían para que el universo inicial fuese precisamente regular. Lo que viene a significar que el modelo de batidora explica muy pocas cosas. La búsqueda de procesos de suavizado complicados y que requieran menos condiciones especiales es una parte del trabajo que se continúa realizando en cosmología caótica.

Abandonemos ya la época de la inte-

racción débil y acerquémonos más a la singularidad cosmológica explorando con precaución los primeros milisegundos del universo. Allí donde las temperaturas y las energías de las partículas exceden a las logradas por los más poderosos aceleradores construidos por el hombre, y la densidad de radiación es comparable a la densidad del núcleo atómico, la fuerza entre partículas dominante es la interacción fuerte. La extrapolación de nuestro modelo hasta esos tiempos iniciales es algo precaria debido a las lagunas de nuestro conocimiento de la física básica. Cuando la interacción fuerte aniquila un protón y un antiprotón, da lugar a dos fotones de gran energía que se mueven en direcciones opuestas. En el primer milisegundo del universo, la temperatura tendría que haber sido tan alta que dicha aniquilación y el proceso inverso, la producción espontánea de nucleones y antinucleones a partir de fotones, debían ser de suma eficacia. Los nucleones y la radiación serían indiscernibles. La entropía media de 10^8 fotones por nucleón observada hoy implica que, cuando tuvo lugar la última aniquilación, sobrevivió un protón por cada 10^8 fotones creados por la destrucción de otros pares de partículas y antipartículas.

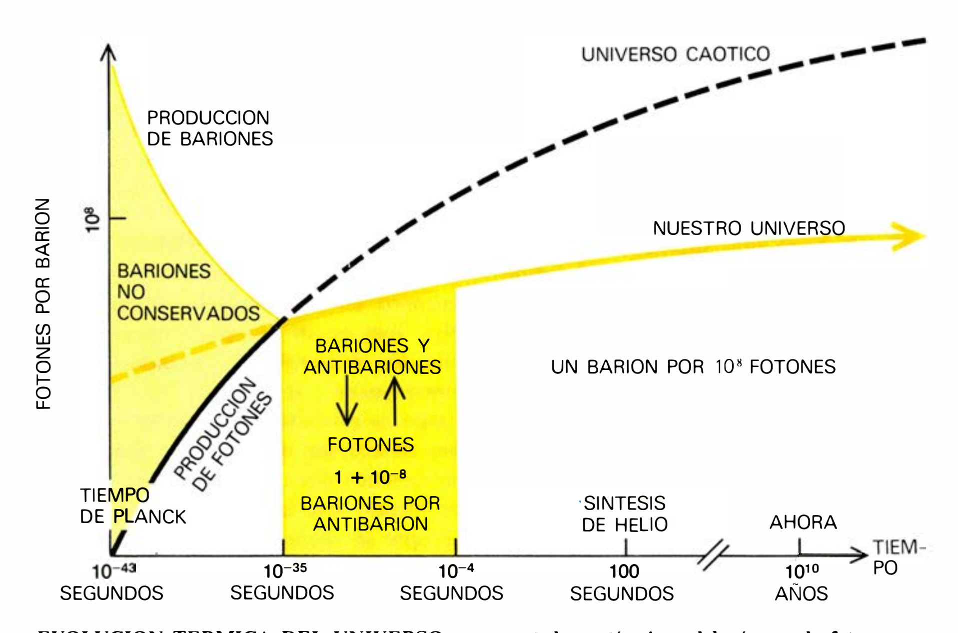
Según parece, inmediatamente antes de que el universo cumpliese su primer milisegundo, hubo un mínimo desajuste entre materia y antimateria: 1,00000001 partículas por antipartícula. Hasta hace muy poco, el origen de este peculiar desequilibrio se hallaba envuelto en el más absoluto misterio, habida cuenta de un principio que tiene relación con los bariones o partículas pesadas, nucleones incluidos, que sufren las interacciones fuertes. Los físicos creían que el número de bariones de un sistema menos el número de antibariones estaba completamente fijado para todo instante. Ninguna interacción o transformación de las partículas podía, en manera alguna, cambiar esta cantidad. Si ello fuera cierto para el universo en conjunto, la asimetría de una parte en 10^8 de materia sobre antimateria debió reinar en la estructura inicial de la gran explosión.

A lo largo del año pasado, los cosmólogos han estado investigando activamente las consecuencias de una nueva extensión de la teoría de la materia, en la que las fuerzas electromagnéticas, las interacciones débiles y las fuertes se unifican a temperaturas suficientemente altas. Por encima de 10^{26} grados K, esas fuerzas pierden su individualidad, mientras que a temperaturas más bajas parecen ser independientes (aunque son en realidad diferentes aspectos de una unidad subyacente). Sólo cabe ese tipo de unificación en la hipótesis de que los quarks constituyentes de los protones y otras clases de partículas elementales puedan desintegrarse. Tal desintegración comporta una sorprendente consecuencia: el protón es una partícula inestable, aunque tiene una vida media de unos 10^{31} años. Pese a la rareza de la desintegración de protones, los físicos abrigan la esperanza de observar alguna desintegración dentro del próximo año, más o menos, mediante un experimento en el que se examina una masa suficientemente grande: 1000 toneladas de materia, constituidas por unos 10^{32} protones.

La posibilidad de un proceso tan infrecuente indica que el nivel de asimetría partícula-antipartícula en el universo, que determina la entropía observada, no es absolutamente invariante. Pudo cambiar radicalmente en los primeros 10^{-35} segundos del universo, cuando abundaban los procesos que propiciaron la desintegración de los protones. Recientes trabajos muestran que, tras este temprano instante, se logra con el tiempo congelar un nivel estable de asimetría en el universo entre partículas y antipartículas; el valor predicho se acerca a la asimetría observada de una parte en 10^8. No es necesario que la entropía registrada dependa fuertemente de las condiciones iniciales de la gran explosión en los primeros 10^{-35} segundos.

Hasta aquí sólo hemos atendido a las propiedades corpusculares de la materia. Al especular sobre lo que ocurrió inmediatamente después de la gran explosión, deben también considerarse las propiedades ondulatorias de la materia. Según la mecánica cuántica, cada partícula se comporta como una onda con una longitud igual a $2,1 \times 10^{-37}$ dividido por la masa de la partícula. Esta longitud de onda, llamada longitud de onda de Compton, es infinitesimal si se juzga por criterios corrientes, pero a los 10^{-23} segundos (tiempo de Compton) de la gran explosión, la longitud de onda de Compton (10^{-13} centímetros) de un protón sería igual al tamaño de la región causalmente conectada del universo. No hay nada fundamental acerca de esta escala, sin embargo, porque tampoco nada es fundamental hablando de los protones, que naturalmente están constituidos por quarks.

La barrera última se alcanza para tiempos del orden de 10^{-43} segundos (tiempo de Planck) tras la gran explosión, porque las regiones causalmente conectadas del universo estaban comprimidas a una escala menor que la longitud de onda de Compton de su masa total. Antes del tiempo de Planck, carece probablemente de validez la interpretación usual del espacio-tiempo, porque las fluctuaciones de la mecánica cuántica dominan la geometría del espacio-tiempo. Es indudable que la comprensión del tiempo pre-Planck revelaría muchos secretos del universo, pero alcanzar tal conocimiento constituye hoy una posibilidad remota. Su consecución quizás haya de esperar el advenimiento de una nueva teoría física que sintetice



EVOLUCION TERMICA DEL UNIVERSO, representada en términos del número de fotones por barión, que es una medida de la entropía: el número de estados posibles en un sistema. Se sabe poco acerca de la época anterior a 10^{-43} segundos, porque bajo las condiciones que predominaban en aquella época, la teoría general de la relatividad y la teoría de la mecánica cuántica parecen estar en contradicción. Antes de 10^{-4} segundos había un desequilibrio entre materia y antimateria que puede haber surgido espontáneamente aproximadamente a 10^{-35} segundos. Si el universo hubiera sido caótico antes de 10^{-35} segundos, cualquier proceso de suavizado que condujese a la forma altamente homogénea del universo de nuestros días habría producido muchos más fotones por barión que los hoy observados.

TIEMPO COSMICO	EPOCA	CORRIMIENTO HACIA EL ROJO	SUCESO	AÑOS TRANSCURRIDOS
0	Singularidad	infinito	Gran explosión	20×10^9
10^{-43} segundos	Tiempo de Planck	10^{32}	Creación de partículas	20×10^9
10^{-6} segundos	Era hadrónica	10^{13}	Aniquilación de parejas protón-antiprotón	20×10^9
1 segundo	Era leptónica	10^{10}	Aniquilación de parejas electrón-positrón	20×10^9
1 minuto	Era de radiación	10^9	Nucleosíntesis de helio y deuterio	20×10^9
1 semana		10^7	La radiación se termaliza antes de esta época	20×10^9
10.000 años	Era de la materia	10^4	En el universo predomina la materia	20×10^9
300.000 años	Era del desacoplamiento	10^3	El universo se hace transparente	$19{,}9997 \times 10^9$
$1\text{-}2 \times 10^9$ años		10-30	Comienzan a formarse las galaxias	$18\text{-}19 \times 10^9$
3×10^9 años		5	Las galaxias comienzan a acumularse	17×10^9
4×10^9 años			Nuestra protogalaxia colapsa	16×10^9
$4{,}1 \times 10^9$ años			Se forman las primeras estrellas	$15{,}9 \times 10^9$
5×10^9 años		3	Nacen los quasars; población II de estrellas	15×10^9
10×10^9 años		1	Se forma la población I de estrellas	10×10^9
$15{,}2 \times 10^9$ años			Nube interestelar que origina nuestro sistema	$4{,}8 \times 10^9$
$15{,}3 \times 10^9$ años			Colapso de la nebulosa protosolar	$4{,}7 \times 10^9$
$15{,}4 \times 10^9$ años			Se forman los planetas; solidifican las rocas	$4{,}6 \times 10^9$
$15{,}7 \times 10^9$ años			Bombardeo de los planetas con producción de cráteres	$4{,}3 \times 10^9$
$16{,}1 \times 10^9$ años	Era arqueozoica		Se forman las rocas terrestres más antiguas	$3{,}9 \times 10^9$
17×10^9 años			Se forma la vida microscópica	3×10^9
18×10^9 años	Era proterozoica		Se desarrolla una atmósfera rica en oxígeno	2×10^9
19×10^9 años			Se crea la vida macroscópica	1×10^9
$19{,}55 \times 10^9$ años	Era paleoozoica		Los fósiles más antiguos conocidos	600×10^6
$19{,}55 \times 10^9$ años			Primeros peces	450×10^6
$19{,}6 \times 10^9$ años			Primeras plantas terrestres	400×10^6
$19{,}7 \times 10^9$ años			Helechos, coníferas	300×10^6
$19{,}8 \times 10^9$ años	Era mesozoica		Primeros mamíferos	200×10^6
$19{,}85 \times 10^9$ años			Primeras aves	150×10^6
$19{,}94 \times 10^9$ años	Era cenozoica		Primeros primates	60×10^6
$19{,}95 \times 10^9$ años			Aumentan los mamíferos	50×10^6
20×10^9 años			Homo sapiens	1×10^5

LISTA DE LOS ACONTECIMIENTOS más importantes en la historia del universo. La escala de tiempo de los sucesos muy antiguos debe ser considerada provisional porque no se conoce la edad precisa del universo. Es mejor fijar la fecha de tales sucesos en términos del corrimiento hacia el rojo, que es una medida del grado de compresión del universo en expansión. A las ultra-altas velocidades de los instantes próximos a la gran explosión, el corrimiento hacia el rojo es igual a $(1 + v/c) / (1 - v^2/c^2)^{1/2} - 1$, donde v es la velocidad de la fuente de radiación y c es la de la luz (3×10^8 m/s).

las teorías de la relatividad y cuántica. Los cosmólogos consideran el tiempo de Planck como el momento efectivo de la creación del universo, dejando a la especulación cualquier posibilidad de una fase anterior de la evolución.

El intervalo que media entre los tiempos de Planck y de Compton sí es más accesible al trabajo teórico. En tal época, la mecánica cuántica apunta a un mecanismo que podría haber borrado las irregularidades del universo. Según la mecánica cuántica, todo el espacio está lleno de pares de partículas y antipartículas "virtuales". Tales partículas, que se materializan en parejas, se separan, vuelven a unirse y se aniquilan mutuamente, se llaman virtuales porque, a diferencia de las partículas reales, no se pueden observar directamente por detectores de partículas, aunque podemos medir sus efectos indirectos. Si una pareja de partículas virtuales está sometida a un campo de fuerza que sea extremadamente poderoso o de variación muy rápida, sus componentes podrían separarse con tal celeridad que nunca puedan reunirse de nuevo. En este caso las partículas virtuales se convertirían en reales y la energía del campo de fuerzas suministraría su masa. En la vecindad del tiempo de Planck, el campo de fuerzas requerido podría ser originado por la cambiante expansión dinámica del propio universo.

El astrofísico ruso Ya. B. Zel'dovich ha propuesto la idea de que la producción de partículas reales a partir de las virtuales borraría las anisotropías y faltas de uniformidad en la estructura inicial del universo. Se supone que la radiación y las partículas estarían preferentemente distribuidas en las regiones del espacio dotadas de mayor energía. Las partículas recién formadas transportarían energía desde las regiones de alta densidad a las de densidad baja. Además, tenderían a igualar las velocidades de expansión en diferentes direcciones. De la misma manera que las personas que suben a un tiovivo en rotación tienden a hacer ésta más lenta, la brusca aparición de partículas retardaría las regiones en movimiento y en rápida rotación. Quizá sea este mecanismo de la mecánica cuántica el responsable de la estructura, homogénea a gran escala, del universo de hoy día.

En la exposición anterior hemos pasado revista a varios mecanismos suavizadores a los que podría imputarse la presente regularidad del universo, mecanismos tales como el transporte por neutrinos y la creación de partículas reales a partir de las virtuales. Por prometedores que esos mecanismos parezcan, creemos que ciertas consideraciones termodinámicas demuestran que tienen importantes limitaciones. Como la entropía aumenta con el tiempo, el presente nivel de entropía en el universo (10^8) establece un límite superior a la cantidad de disipación que ha tenido lugar durante la pasada historia del universo. El suavizado de anisotropías e irregularidades en la estructura inicial convertiría irreversiblemente la energía de irregularidad en

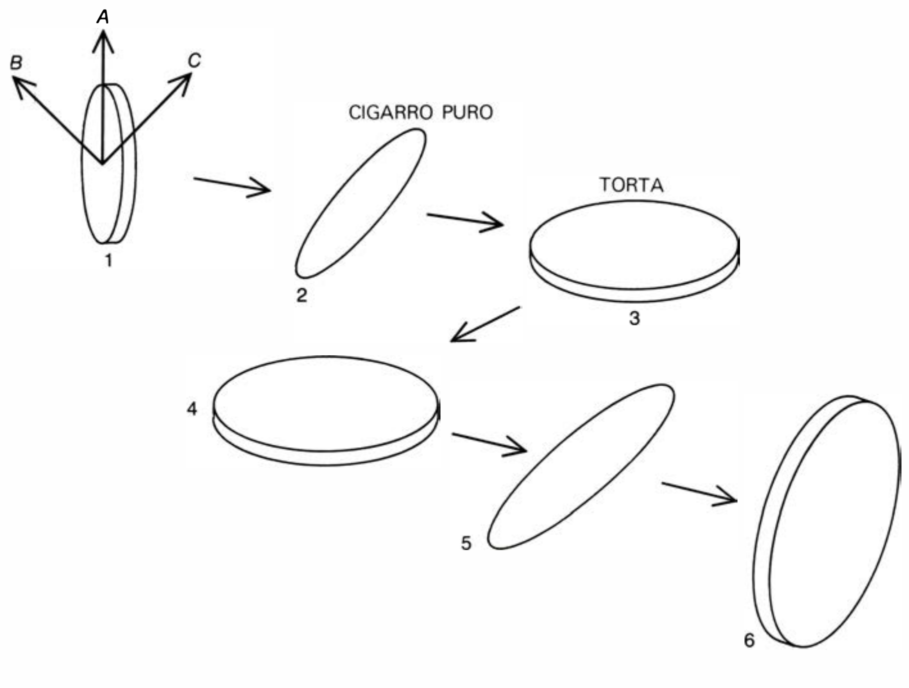
energía térmica. La eliminación del caos primitivo generaría radiación, pero el bajo nivel de la radiación de fondo en microondas indica que en el pasado no pudo haber un nivel arbitrariamente alto de calentamiento y suavizado.

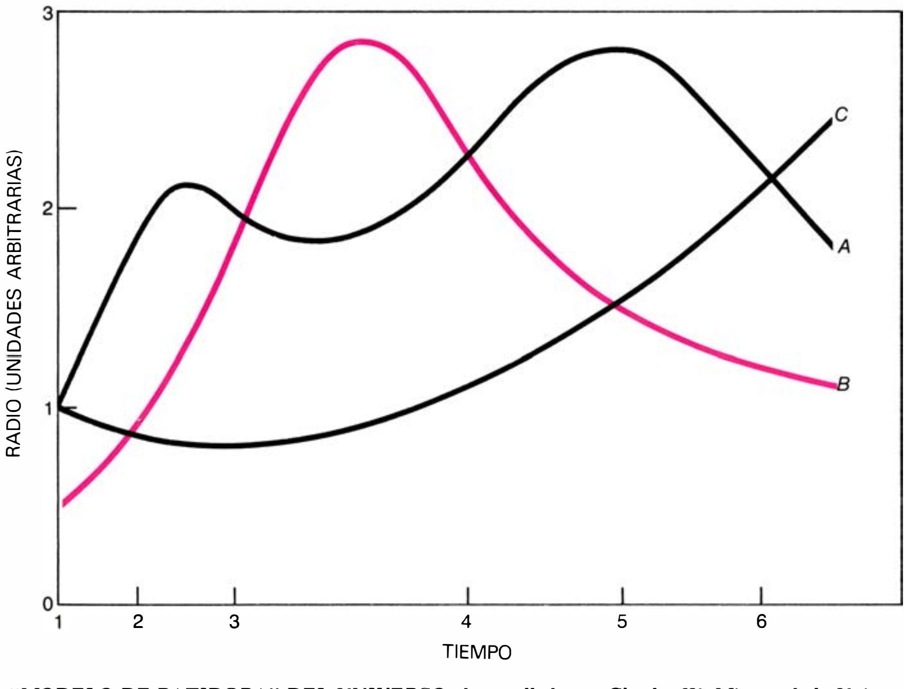
Además, se ha demostrado que, en general, cuanto antes tras la gran explosión se amortiguasen las irregularidades, tanto mayor sería la energía térmica generada. La mayoría de los mecanismos disipativos que hemos analizado serían completamente operantes inmediatamente después de la gran explosión. Esto significa que si el universo se hubiera creado con algo más de un pequeño grado de irregularidad, se habría originado en la singularidad una cantidad de entropía superior al nivel observado. Pero, ¿cuál debió ser el pequeño grado de irregularidad inicial? El trabajo de Barry Collins y Stephen Hawking muestra que un universo altamente, aunque no perfectamente, regular es inestable. La más ligera desviación respecto a la regularidad tendería a crecer con el tiempo a medida que se expandiera el universo, con independencia de los mecanismos disipativos. Dicho de otra manera, un universo que comenzara su expansión con cualquier configuración excepto la precisamente regular, tendería a adquirir una creciente irregularidad. Ello equivale a decir que las irregularidades iniciales quizá fueran sólo infinitesimales. Nuestro propio trabajo indica que hay una jerarquía de irregularidades en el universo. A medida que se examinan volúmenes de espacio progresivamente mayores, el grado de irregularidad decrece de una manera que sugiere que las irregularidades iniciales no eran más que fluctuaciones estadísticas de un estado regular.

Lo que queremos expresar es que el presente nivel de entropía muestra que el universo ha evolucionado de una manera sumamente regular desde un tiempo tan lejano como los primeros 10^{-35} segundos de su existencia. Antes de esa fecha, procesos complejos que llevan consigo la no conservación de la simetría de partículas y antipartículas y las propiedades cuánticas del campo gravitatorio borraron cualquier memoria de la entropía inicial por nucleón. Aunque la disipación del caos en esos primeros momentos pudo haber generado también muchos fotones, se habrían creado igualmente nucleones, y el número neto de fotones por nucleón podría haber aumentado o disminuido. Por supuesto, la entropía total de la materia y radiación en el universo debe siempre aumentar.

Queda por resolver la cuestión de si las condiciones iniciales son únicas o si otro conjunto de condiciones iniciales podría haber conducido al mismo resultado. Los teóricos han propuesto varios candidatos para condiciones iniciales. Una posibilidad es que la interacción fuerte sirviera para mantener la materia con alto grado de rigidez en el momento de la singularidad. A densidades extremadamente altas, dos nucleones se repelerían entre sí de la misma manera que lo hacen dos polos magnéticos del mismo nombre. Tal repulsión, que impediría el colapso de los núcleos pesados, podría llegar a dominar el comportamiento general de las partículas interaccionantes. Un estado temprano regido por la interacción fuerte permanecería muy regular porque la alta presión impediría que se desarrollasen distorsiones o turbulencia al aumentar la densidad.

Otra posibilidad, desarrollada por Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, se basa en la propuesta de que el campo gravitatorio general del propio universo tiene una entropía que es pro-





"MODELO DE BATIDORA" DEL UNIVERSO, desarrollado por Charles W. Misner, de la Universidad de Maryland. Se trata de un complejo modelo cosmológico que obedece a la teoría general de la relatividad. El "universo batidora" es una esfera de fluido que se expande por medio de una sucesión de formas de cigarro puro y de torta orientadas al azar. Al expandirse el universo en una dirección, se contrae en dirección perpendicular (*arriba*). La variación de los radios de los tres ejes ortogonales (*A*, *B* y *C*) en función del tiempo muestra la transición de la forma de torta a la forma de puro al aumentar el volumen del universo (*abajo*). Las cifras sobre el eje de tiempos corresponden a las seis formas.

porcional a, y dependiente de, su uniformidad. La entropía gravitatoria, como todas las demás formas de la entropía, debe siempre aumentar con el tiempo; por tanto: el estado inicial del universo debió poseer entropía gravitatoria y regularidad bajas. Para minimizar la entropía gravitatoria, el universo podría haber adquirido una configuración regular e isotrópica, de igual manera que una pompa de jabón minimiza la entropía asociada al área de su superficie adoptando una forma esférica e isotrópica. A medida que el universo envejece y se expande, la entropía gravitatoria aumenta para reflejar el crecimiento de heterogeneidades tales como galaxias y cúmulos.

Todavía hay otra posibilidad especulativa para las condiciones iniciales del universo, basada en el principio de Mach: el movimiento de un objeto no está determinado por las características de algún espacio geométrico "absoluto", sino por el contenido material del universo. (El principio fue primeramente avanzado por Ernst Mach en 1893, en una crítica del concepto de Newton de un espacio absoluto al que se refiere el movimiento de todos los objetos.) Aunque el principio de Mach no es una consecuencia de la teoría de la relatividad, se ha introducido en la teoría, bien como una condición de contorno en las ecuaciones relativistas o bien como un cedazo para eliminar soluciones que no son físicamente aceptables. Derek Raine ha desarrollado una versión detallada de la última alternativa, y como consecuencia de su trabajo emerge el requisito de que el universo recién nacido tuvo que ser casi completamente isótropo y homogéneo.

La última posibilidad que consideraremos se basa en la idea de que las condiciones iniciales estaban limitadas por el propio hecho de haber conducido a la existencia de vida humana en la Tierra. Esta idea, llamada principio cosmológico antrópico, fue introducida por G. J. Whitrow, de la Universidad de Londres, Robert H. Dicke, de la Universidad de Princeton, y Brandon Carter, del Observatorio de Meudon, y fue desarrollada por John A. Wheeler, de la Universidad de Texas en Austin. Consideremos la manera como este principio influye en la cuestión del tamaño del universo. Al hallarse en constante expansión, el tamaño del universo depende de su edad. El principio cosmológico antrópico nos ha convencido de que el universo debe inevitablemente tener un diámetro de unos diez mil millones de años luz. Un universo más pequeño habría existido durante menos de los mil millones de años necesarios para que los elementos pesados esenciales para la vida humana se hayan podido sintetizar por reacciones termonucleares en el interior de las estrellas. Por otra parte, si el universo fuera mucho mayor, y por ende mucho más viejo, las estrellas necesarias para establecer las condiciones de vida habrían tenido tiempo sobrado de completar su evolución y agotarse.

El principio cosmológico antrópico guarda relación con el nivel de entropía del universo, de 10^8. Si este número se multiplicase por un factor 1000, o parecido, no sería posible que las protogalaxias se condensasen a la densidad a la que se forman las estrellas. Sin estrellas, el sistema solar y los elementos pesados de la materia viviente no habrían podido crearse. Si el universo fuera inicialmente bastante irregular, habría generado irreversiblemente copiosas cantidades de calor radiante a causa de los muchos y eficaces canales de generación de entropía abiertos a él en el instante de la singularidad. De nuevo, esto habría dado por resultado una entropía y una presión de radiación superiores a los valores que favorecen la condensación de protogalaxias. El hombre jamás hubiera podido contemplar ese universo. Estas ideas indican una cosa: nuestra existencia constituye un factor limitante con respecto a las clases de universos que podríamos observar. Muchas características del universo sobre las que vale la pena reflexionar son prerrequisitos para la existencia de observadores.

Este enfoque poco corriente se ha extendido incluso a los valores de las constantes fundamentales de la naturaleza. Consideremos una variación de un pequeño porcentaje en la intensidad de la constante de acoplamiento de la interacción fuerte. Un aumento pequeño, piénsese en un 2 por ciento, impediría la formación de protones a partir de los quarks, y, por tanto, la formación de átomos de hidrógeno. Una disminución comparable haría inestables ciertos núcleos esenciales para la vida. De la misma manera, pequeñas variaciones en la carga eléctrica del electrón impedirían cualquier clase de química y prohibirían la existencia de estrellas estables con sistemas planetarios.

Aunque el principio cosmológico antrópico indica por qué las características estructurales del universo son en cierto sentido inevitables, continúa siendo un misterio la razón de esas características. Cualquiera que sea la categoría científica del principio cosmológico antrópico, su impacto en la historia de las ideas puede ser importante. El principio supera la tradicional barrera entre el observador y lo observado.

Ecología social de los coyotes

La naturaleza del alimento de que disponen parece determinar si viven solos o en manada. Estas pautas de comportamiento pueden relacionarse con la cuestión de si constituyen o no una amenaza para el ganado

Marc Bekoff y Michael C. Wells

Las películas sobre el Oeste americano casi siempre presentan a los coyotes de la misma manera, como animales solitarios que aúllan lastimeramente sobre la cima de una distante colina. En realidad, los coyotes son animales versátiles que exhiben una amplia gama de comportamientos. Se caracterizan por modos de organización social muy variables, que van desde los individuos solitarios (con excepción de la estación reproductora) y nómadas hasta los grupos gregarios y estables, que pueden vivir en la misma región por un período de tiempo prolongado. Entre los dos extremos se encuentran individuos solitarios y parejas apareadas que tienden a asentarse en una zona. De hecho, un coyote puede recorrer, a lo largo de su vida, todos los escalones de la sociabilidad. Esta notable flexibilidad en la manera en que los coyotes interactúan entre sí puede entenderse mejor si se examina su ecología, o la manera como interactúan con su ambiente.

Se acepta de modo general que la mayor parte de las características de un animal son producto de una interacción entre ciertas predisposiciones heredadas y el ambiente. En otras palabras, aunque el tránsito acumulativo de genes que realizan los individuos que se reproducen con éxito establece determinadas tendencias en cada animal, muchos rasgos observables se hallan sujetos a modificación por parte de factores próximos, o inmediatos, en el ambiente del animal. De este modo, muchos de los rasgos de un animal, en particular los de comportamiento, pueden considerarse adaptaciones a los ambientes en los que el animal ha vivido o se halla viviendo. Así, el etólogo holandés Hans Kruuk, que ha realizado estudios intensivos acerca de las hienas, ha llegado a la conclusión de que para muchos carnívoros grandes, que típicamente tienen pocos depredadores (aparte del hombre), la naturaleza de los recursos alimentarios es un importante factor próximo que influye sobre el comportamiento social. De modo más preciso, parece que el origen de las variaciones en la sociabilidad de los carnívoros de la misma especie puede hallarse frecuentemente en diferencias en su suministro de alimento.

Durante los últimos tres años hemos estado observando el comportamiento de los coyotes en la naturaleza, principalmente en el Parque Nacional Grand Teton, cerca de la ciudad de Jackson, en Wyoming nororiental. De acuerdo con nuestra investigación, la organización social de los coyotes es efectivamente un reflejo de sus recursos alimentarios. A este respecto, existen tres variables que tienen un impacto directo y significativo: el tamaño de las presas disponibles, la distribución espacial de las mismas y su distribución temporal o estacional. Daremos cuenta de nuestros hallazgos sobre las adaptaciones de comportamiento específicas que los coyotes parecen efectuar a los distintos tipos de alimento, así como de las ventajas que estas adaptaciones parecen conferirles. Antes de emprender la tarea de seleccionar este aspecto de la compleja relación que existe entre los coyotes y su ambiente, describiremos brevemente estos animales y el marco físico en que los estamos estudiando.

Los coyotes (*Canis latrans*) pertenecen a la misma familia de mamíferos (Cánidos) que los chacales, los zorros, los lobos y los perros domésticos. Hay 19 subespecies reconocidas de coyotes, pero debido a que los animales son en la actualidad más móviles de lo que eran y se entrecruzan en una medida mayor, parece haber pocas razones para conservar esta clasificación tan detallada. Los coyotes se aparean una vez al año y por lo general son monógamos; la misma pareja puede, pues, aparearse en la misma región durante largos períodos de tiempo, y con frecuencia vuelve al mismo cubil un año tras otro. (Los coyotes paren a sus crías en agujeros en el suelo, que pueden o no excavar por sí mismos; los coyotes que nosotros observamos solían aprovechar los agujeros que ya habían excavado tejones.)

En un estudio de coyotes realizado en la provincia canadiense de Alberta, Donald Bowen, de la Universidad de Columbia Británica, advirtió que los coyotes que viven en manadas no sólo comen, duermen y viajan en estrecha asociación, sino que tienden además a exhibir relaciones de dominancia. Franz J. Camenzind, que estudió los coyotes en el Refugio Nacional del Uapití, contiguo a la ciudad de Jackson, ha hecho observaciones similares. En general, los miembros de una manada se muestran más sociables entre sí que con los extraños, los coyotes solitarios que viven en la misma zona o que pasan por ella, por ejemplo. Parece que la mayoría de miembros de una manada de coyotes se hallan emparentados genéticamente. De hecho, la base de la estructura social del coyote es probablemente la pareja, suplementada por los descendientes que no abandonan la manada cuando son lo bastante mayores como para cuidar de ellos mismos.

Típicamente, en cada manada sólo se reproducen un macho y una hembra. Algunos de los individuos no reproductores de la jauría pueden ayudar a criar a otros miembros de la misma, con gran probabilidad sus hermanos más jóvenes, y a defender los recursos de alimento, principalmente frente a otros coyotes. Las manadas pueden incluir asimismo gorrones no reproductores, que también suelen ser descendientes de la pareja origen de la manada y que, si bien continúan viviendo cerca de la misma, interactúan muy poco con ella. (Es posible que estos individuos se beneficien de esta asociación mínima al "heredar" una zona de reproducción después de que un progenitor la abandona o muere.)

Los coyotes se encuentran en hábitats diversos en Canadá, América Central y la mayoría de los estados continentales de los Estados Unidos, pero incluso en un medio geográfico determinado su comportamiento social puede variar de manera espectacular. Nuestra localidad principal para la observación a largo plazo de coyotes salvajes es la región que rodea Blacktail Butte, en el rincón sudoriental del Parque Nacional Grand Teton. Se trata de un lugar especialmente adecuado para un estudio del comportamiento y de la ecología, porque los animales residentes apenas si sufren presión humana. Además, desde Blacktail Butte, que se eleva a unos 300 metros del valle circundante, es fácil observar a los coyotes mientras se dedican a sus actividades normales. Completamos nuestros hallazgos de la región de Blacktail Butte con observaciones de coyotes que uno de nosotros (Bekoff) hizo con la ayuda de varios estudiantes en el Parque Nacional Rocky Mountain, en Colorado. En la sección de Moraine Park de este parque, donde se realizó el estudio, las condiciones ambientales diferían bastante de las que había en Blacktail Butte, de manera que en muchos casos el comparar los datos procedentes de las dos localidades nos ha ayudado a identificar las variables que influyen sobre el comportamiento social. Asimismo, hemos realizado experimentos con animales en cautividad, con el fin de controlar mejor las variables de competencia importantes.

Para estudios como el nuestro conviene poder identificar a varios miembros de una población salvaje. Ahora bien, en el caso de los coyotes, las características distintivas como el tamaño (que va de ocho a 20 kilos para los machos) y el color del pelaje (una mezcla muy variable de blanco, gris, pardo y rojizo) pueden cambiar con el tiempo. En consecuencia, ha sido necesario capturar y marcar a los distintos coyotes, y con este fin hemos utilizado generalmente cepos, cuyos dientes recubrimos con un grueso acolchamiento de algodón para reducir la probabilidad de herir al animal atrapado. Para evitar que el coyote se revuelva en la trampa solemos fijar a la misma una píldora tranquilizante, que el animal ingiere. El sedante tranquiliza al coyote atrapado, sin llegar a dejarlo inconsciente. Las series de trampas se recorren a pie, en esquíes o en automóvil cada seis a ocho horas, de manera que no se retiene a los coyotes más tiempo del necesario.

Una vez ha sido capturado, un coyote se vuelve extremadamente dócil, de modo que cuando encontramos a un animal en una de nuestras trampas, lo liberamos de inmediato y procedemos después a pesarlo, anotar su sexo, hacer una evaluación de su condición física y estimar su edad. Seguidamente fijamos una etiqueta de identificación coloreada a cada oreja y le colocamos un collar que porta un pequeño transmisor de radio. De este modo, después de soltarlo, podemos identificarlo incluso cuando no se le puede ver, y siempre podemos saber qué coyotes se asocian entre sí. Sin embargo, y puesto que la zona que rodea Blacktail Butte es bastante abierta,



MIEMBROS DE UNA MANADA DE COYOTES se agrupan alrededor del cadáver de un uapití en la nieve del Refugio Nacional del Uapití, inmediato a la ciudad de Jackson, en Wyoming. Los coyotes exhiben pautas de organización social notablemente flexibles, que van desde los individuos transeúntes y las parejas apareadas hasta grupos grandes y estables que tienden a permanecer en una zona. Los estudios de estos animales en la naturaleza indican que vivir en manada representa una adaptación a recursos alimentarios grandes y agrupados, como la carroña de ungulados (mamíferos con pezuña), mientras que la vida en solitario se halla asociada a la disponibilidad de pequeñas presas vivas, como roedores (*véase la ilustración de la página 91*). Raramente se han observado coyotes depredando a los grandes ungulados (uapitíes, alces, etcétera) cuya carroña los sustenta generalmente durante el invierno; el uapití que se ve en esta fotografía murió por otras causas. (La fotografía fue tomada por W. Perry Conway.)

podemos seguirlos (con prismáticos o mediante un telescopio situador, si no es posible hacerlo a simple vista), y los transmisores de radio sirven sobre todo para la obtención de datos sobre los movimientos de largo alcance de los individuos y los grupos.

La naturaleza de los recursos alimentarios puede influir de muchos modos sobre el comportamiento social de los coyotes. Por ejemplo, cuando hay grandes animales presa disponibles, como ungulados (mamíferos con pezuñas), se ha visto que diversos carnívoros (incluyendo leones, lobos, chacales y lobos pintados africanos) se agrupan en manadas para realizar una caza cooperativa. Vivir en manada puede implicar asimismo una adaptación para la defensa de suministros importantes de alimento, como provisiones de carroña. Las obser-



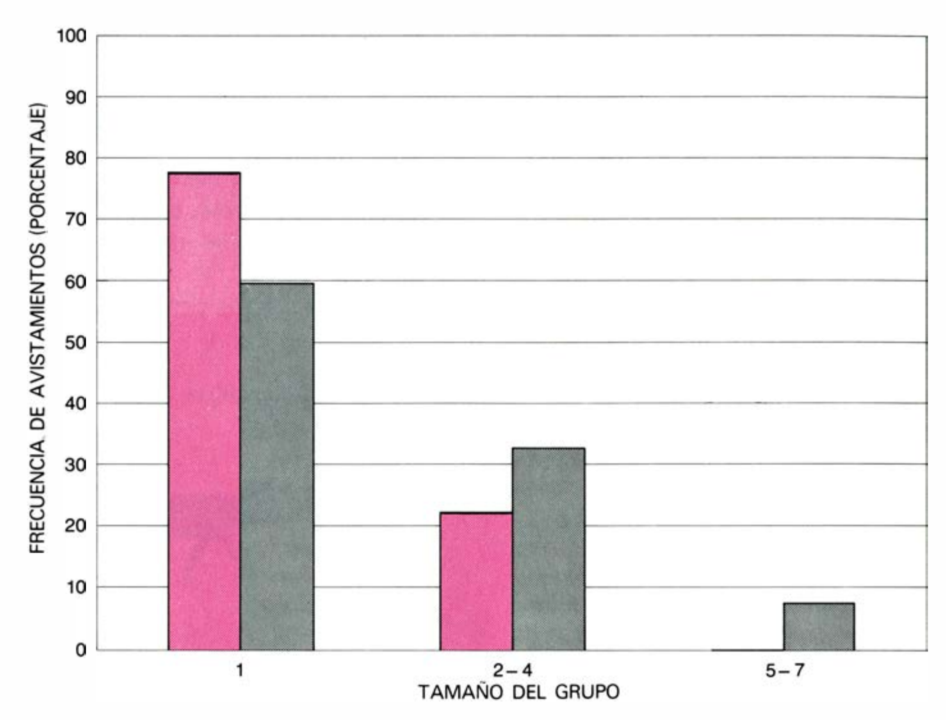
DEFENSA DE LA CARROÑA (no visible) por un miembro de la manada mediante "amenaza con la boca abierta" en presencia de un coyote intruso, al objeto de ahuyentarlo. Los dos coyotes de la derecha, abajo, pertenecen a la misma manada que el coyote del centro y por ello no son amenazados y permanecen cerca de la carroña. La capacidad de defender un suministro alimentario de este tipo parece ser una de las principales ventajas de vivir en manada. La fotografía fue tomada, al igual que la de abajo, por Franz J. Camenzind, quien ha estudiado los coyotes en el Refugio Nacional del Uapití.



CACHORROS DE COYOTE de tres semanas de edad, que precisan ser alimentados y protegidos y permanecen cerca del agujero en el suelo que les sirve de cubil. (Aunque los coyotes pueden excavar su propio cubil, estos cachorros se hallan en una madriguera de tejón abandonada que sus padres ampliaron.) Los cachorros de coyote comienzan a realizar incursiones lejos del cubil cuando tienen de dos a tres meses de edad, y pueden desenvolverse por sí mismos cuando tienen de seis a nueve meses de edad. Parece que la mayoría de los miembros de una manada de coyotes se hallan genéticamente emparentados, y que la base de la estructura social de los coyotes es probablemente la pareja apareada, suplementada por varios descendientes que no se dispersan. En la mayoría de los casos sólo una pareja macho-hembra de la manada se reproduce. Pertenecen a la familia de los Cánidos.

vaciones de David Macdonald, del Animal Behavior Research Group, de la Universidad de Oxford, indican que esto es lo que ocurre en los chacales comunes o dorados (*Canis aureus*) que se encuentran en Israel. Hemos observado que para los coyotes, por lo menos en las condiciones en que los estamos observando, la caza de grupo es una empresa rara y por lo general infructuosa. En realidad, desde nuestro puesto de observación en Blacktail Butte no hemos visto nunca a un grupo de coyotes, o a un coyote solitario, atacar a un ungulado grande vivo. Por otra parte, nuestros hallazgos y los de Bowen señalan que los coyotes se agrupan para defender determinados recursos alimentarios.

En la zona que rodea Blacktail Butte existe una notable fluctuación estacional de los alimentos que sustentan a los coyotes. En "verano" (el período que va de mayo a octubre), se alimentan principalmente de roedores (tuzas, ratones de campo y ardillas de tierra uinta). En "invierno" (el período desde noviembre a abril) el principal aporte de alimento es la carroña de ungulados como los ciervos (*Cervus elaphus*), el alce (*Alces alces*) y en particular los uapitíes (*Cervus canadensis*) que han muerto por causas distintas de la depredación por coyotes. Para decirlo de otra forma, en verano los coyotes cazan y matan presas pequeñas que por lo general se hallan distribuidas ampliamente en la zona en que aquéllos viven, y en invierno se alimentan de grandes presas muertas (sobre todo uapitíes), que debido a la formación de rebaños y a la caza legal por parte del hombre durante una estación limitada tienden, de ordinario, a encontrarse distribuidos en forma de montones aislados de carroña. El aumento en la disponibilidad de carroña en invierno es un fenómeno extendido, y obedece principalmente a la mayor mortalidad de los ungulados en dicha estación.



VARIACION ESTACIONAL en la sociabilidad de los coyotes. Puede reflejar una fluctuación estacional en la disponibilidad de distintos tipos de presas. Este gráfico compara la frecuencia con la que se avistaron grupos de distintos tamaños desde Blacktail Butte, en el Parque Nacional Grand Teton, Wyoming, durante la estación de "verano" (de mayo a octubre) y la de "invierno" (de noviembre a abril). En verano (*color*), época en la que los coyotes se sustentaban cazando roedores, se mostraron significativamente menos sociables que en invierno, época en la que disponían de carroña de ungulados.

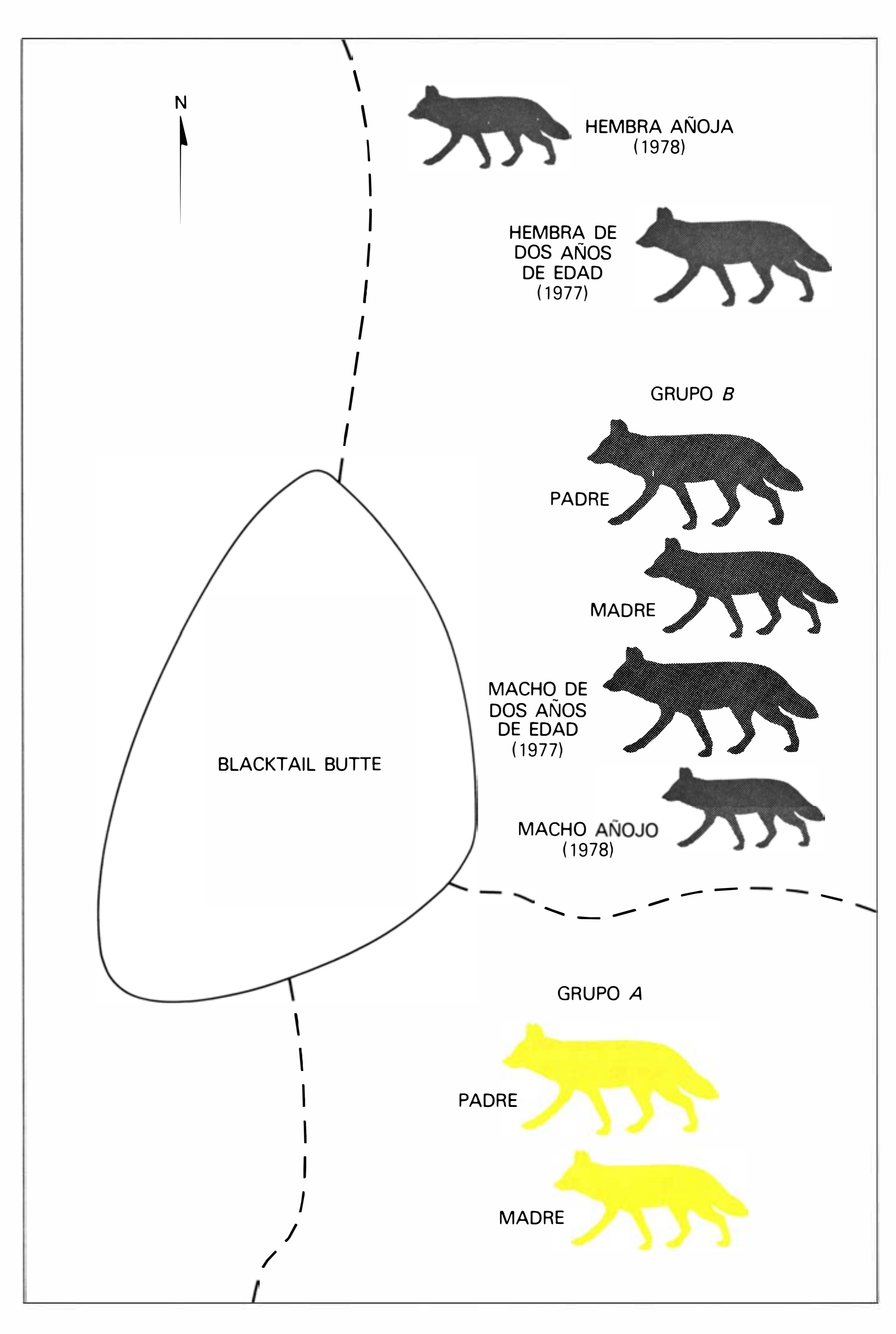
Nuestras hipótesis básicas acerca del papel que el tamaño del alimento y su distribución espacial y estacional desempeñan a la hora de modelar el comportamiento social de los coyotes sugieren que sería posible advertir variaciones en la sociabilidad no sólo de poblaciones de coyotes con acceso a distintos recursos alimentarios, sino también de la sociabilidad de una población única, de una estación a la otra. Para determinar los efectos de la fluctuación estacional de las presas en Blacktail Butte comparamos el tamaño de los grupos de coyotes que encontramos allí en verano y en invierno. Entre septiembre de 1977 y agosto de 1979, efectuamos más de 1000 observaciones de 35 coyotes marcados y de unos 15 no marcados; encontramos que en los meses de verano, cuando los roedores constituían el recurso alimentario principal, el tamaño medio del grupo era de 1,3 individuos, y que en verano la media subía a 1,8. La disponibilidad de piezas alimentarias grandes y agrupadas parece, pues, hallarse en correlación con un aumento de la sociabilidad.

Además, efectuamos otro interesante descubrimiento cuando comparamos nuestros hallazgos con los de Camenzind con respecto a los coyotes del Refugio Nacional para Uapitíes. El lugar de observación de Camenzind dista únicamente unos siete kilómetros del nuestro, pero como sea que allí invernan muchos más uapitíes, el suministro de carroña de ungulados es mayor y más denso. Camenzind encontró que en el refugio de uapitíes los grupos de coyotes eran asimismo mayores, con un tamaño medio de grupo de 1,6 individuos en verano y de 3 en invierno. Este hallazgo sugiere que el aumento en la disponibilidad de carroña de ungulados en invierno no sólo sirve para aumentar la sociabilidad en dicha estación, sino que puede tener también un efecto acumulativo cuyo resultado es un aumento del gregarismo en el verano siguiente. También es interesante señalar que en la región de Moraine Park del Parque Nacional Rocky Mountain, donde durante tres inviernos sucesivos no hubo prácticamente carroña de ungulados, la situación fue muy distinta. Los coyotes se vieron forzados a depender a lo largo de todo el año de pequeños roedores, y el tamaño medio de grupo fue de 1,1, tanto en invierno como en verano.

Comparamos asimismo la frecuencia con la que las tres agrupaciones sociales de coyotes (individuos solitarios, parejas apareadas y manadas de tres o más individuos) podían avistarse en las distintas zonas de observación a lo largo de todo un año. Por ejemplo, en Blacktail Butte el 35 por ciento de nuestras observaciones correspondían a manadas, y cerca del 50 por ciento a individuos solitarios, ya fueran transeúntes que pasaban a través de una zona ocupada por una manada (o por una pareja apareada) o bien coyotes solitarios que vivían en los confines de la zona. Sin embargo, en el refugio de uapitíes, con carroña abundante, sólo un 15 por ciento de las observaciones de Camenzind correspondían a coyotes solos, y alrededor del 60 por ciento a manadas. Parece que en los alrededores de Blacktail Butte, donde la carroña de ungulados escasea más y únicamente se encuentra agrupada en unas pocas zonas, en las manadas que defienden estos recursos pueden vivir menos individuos. Los restantes coyotes, que por lo general se ven excluidos

de los montones de carroña, deben buscar su alimento en zonas más extensas ya sea solos o formando una pareja fundadora. Esta conclusión se ve reforzada por el hecho de que en el Parque Rocky Mountain, donde casi no había carroña, el 97 por ciento de los avistamientos correspondían a individuos solitarios.

No tuvimos que cubrir una zona muy grande para mejor comprender la naturaleza de las agrupaciones de los coyotes y de las ventajas de la adaptación a recursos defendibles. Efectivamente, la observación durante los tres últimos años de dos grupos de coyotes con dominios vitales contiguos en las inmediaciones de Blacktail Butte nos ha proporcionado pruebas abundantes del modo en que el suministro de alimentos puede influir sobre el comportamiento social. (El dominio vital de un animal se define como la zona que recorre de manera rutinaria en el curso de sus actividades diarias.)



DOS GRUPOS DE COYOTES que vivían en dominios vitales contiguos en la región que rodea Blacktail Butte tenían acceso a cantidades significativamente distintas de carroña de uapití en el verano de 1978-79. (Un dominio vital se define como la zona por la que un individuo o una manada transita rutinariamente en el curso de sus actividades diarias.) El dominio vital del grupo *A* poseía el 17 por ciento de la carroña disponible, mientras que el del grupo *B* poseía el 83 por ciento. Como se indica aquí, el tamaño de los grupos difería en consonancia con ello: el grupo *A* (*color*) estaba compuesto por una única pareja apareada, de la que todas las crías de los años previos se habían dispersado; el grupo *B* (*gris*) consistía en una pareja apareada, un macho de dos años que había nacido de esa pareja en 1977 y un macho añojo que les había nacido en 1978. (Una de las ventajas que confiere la vida en manada puede ser que una hembra reproductora recibe ayuda a la hora de cuidar a sus crías; el coyote de dos años del grupo *B* ayudó a criar a sus hermanos nacidos en 1978.) La manada incluía asimismo dos satélites: una hembra que había nacido de una pareja apareada en 1978 y una hembra que se cree les había nacido en 1977. Estos últimos coyotes raramente interactuaban con sus padres o hermanos.

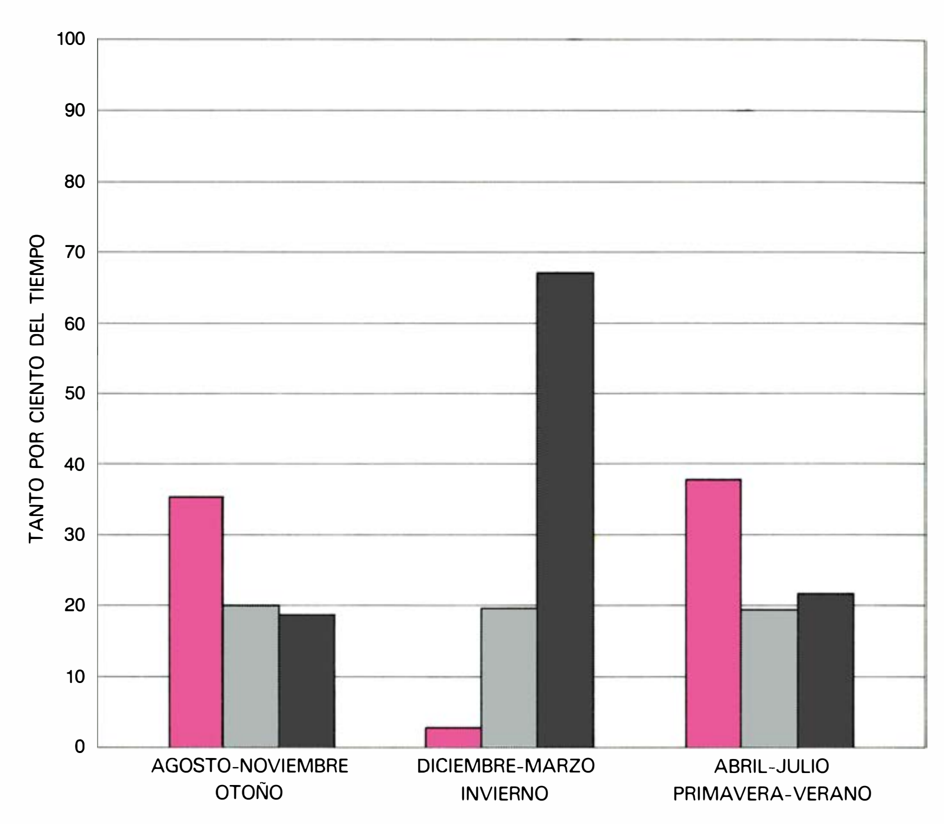
Así, en el invierno de 1978-1979 hubo una diferencia importante en la cantidad de carroña de uapití que se encontraba en los dos dominios vitales. De una manera completamente aleatoria (no se hizo ningún intento de controlar la distribución de carroña en la región de Blacktail Butte), el grupo *A* tenía cerca del 17 por ciento de la carroña disponible y el grupo *B* alrededor del 83 por ciento. Como cabía esperar, el grupo *A* era el más reducido, y estuvo compuesto, desde noviembre de 1978 hasta abril de 1979, de una única pareja fundadora. Todas las crías que la pareja había tenido los años anteriores se habían dispersado.

Durante el transcurso del mismo período, el grupo *B* constaba de cuatro miembros: la pareja originaria, un macho adulto que había nacido de la misma en 1977 y un macho de un año que les había nacido en 1978. (El macho no reproductor más viejo ayudó a criar a sus hermanos nacidos en 1978.) El grupo incluía asimismo dos hembras satélites, una que nació de la pareja en 1978 y otra que creemos que les nació en 1977; aunque estos individuos raramente interactuaban con los miembros de la manada, se les permitía permanecer en las inmediaciones de la misma. Desde noviembre de 1978 hasta mayo del año siguiente (y después), los cuatro miembros principales del grupo *B* estaban muy unidos: comían, dormían, viajaban y defendían la carroña en mutua y estrecha asociación. En este período, sólo el 6 por ciento de las observaciones fueron de individuos solitarios de miembros de la manada, y más del 50 por ciento lo fueron de los cuatro miembros juntos. De noviembre a abril, el macho y la hembra del grupo *A* se observaron juntos el 71 por ciento del tiempo, y en las restantes ocasiones cada animal fue visto en las inmediaciones de otros coyotes, aunque no en estrecha asociación con ellos.

Se ha observado que cuando coyotes que no forman una pareja apareada pasan juntos un invierno, existe una gran probabilidad de que también pasen juntos el verano. Nuestras observaciones de los dos grupos en la zona de Blacktail Butte indican que, cuando abunda el alimento invernal, los cachorros mayores pueden continuar compartiendo al

menos una parte del dominio vital de sus padres, y que si permanecen asociados con sus progenitores a lo largo de su primer invierno, existe una gran probabilidad de que lo sigan estando como añojos a lo largo del verano siguiente y quizá más adelante. Interesa destacar que dos de los jóvenes que abandonaron el dominio vital del grupo *A* (la pareja apareada) en otoño de 1978 volvieron al mismo (desde el Refugio Nacional del Uapití, donde habían pasado el invierno) a la primavera siguiente, y su retorno coincidió con el aumento estacional de roedores en el dominio vital paterno. Estos añojos han permanecido solitarios y no han ayudado a criar a sus hermanos más jóvenes; parecen, en general, menos estrechamente ligados a sus padres que los añojos del grupo *B*, que no abandonaron la manada.

Durante el último invierno (1979-1980) asistimos a la manifestación de otra interesante tendencia en la relación entre la disponibilidad de alimento y la organización social en los grupos de coyotes que viven en las inmediaciones de Blacktail Butte. En los dos inviernos anteriores cayeron densas nevadas en nuestra zona de estudio en el mes de diciembre, pero este año la nieve no cubrió los dominios vitales del grupo *A* (la pareja) y el grupo *B* (la manada) hasta finales de enero. En consecuencia, los animales pudieron disponer de roedores en mayor número y durante un período más largo que en los inviernos precedentes, como suplemento al suministro invernal usual de carroña de uapití. En los dos inviernos anteriores todos los jóvenes del grupo *A* se habían dispersado al llegar noviembre, pero este año, un juvenil nacido en abril 1979 todavía estaba con sus padres en febrero. (En el grupo *B*, tres juveniles nacidos en abril de 1979 permanecían con la manada en febrero.) Parece, por tanto, que un cambio natural en los recursos alimentarios de los coyotes produjo un cambio en su organización social, al menos por un corto período de tiempo. En el futuro se investigarán las consecuencias de este cambio.



CANTIDADES RELATIVAS DE TIEMPO que los coyotes de la zona de Blacktail Butte dedicaban a las actividades de caza (*color*), desplazamiento (*gris claro*) y descanso (*gris oscuro*) en distintas estaciones. En invierno, época en la que los coyotes dependían principalmente de carroña de uapití, los animales cazaban menos y descansaban más que en otras épocas del año. Los coyotes suelen aparearse en los meses de invierno, y su relativa inactividad durante esta estación puede ser beneficiosa para las hembras reproductoras. Una comparación de las actividades invernales de desplazamiento y descanso para las parejas apareadas que viven en manadas y para las que viven en solitario revela un ahorro adicional de energía para las primeras (*véase la ilustración de la página siguiente*). Los porcentajes se basan en 668 horas-coyote de observación (una hora-coyote es la observación de un individuo durante una hora), de septiembre de 1977 a agosto de 1979. Se especifican los meses de las estaciones.

Los vínculos sociales no constituyen el único aspecto del comportamiento social del coyote que se ve afectado por variaciones en el suministro de alimentos. Estas variaciones tienen asimismo una fuerte influencia sobre la manera en que los animales hacen uso del espacio. Para los fines de este estudio conviene distinguir entre un dominio vital, la zona que un animal o un grupo de animales recorre rutinariamente en el curso de sus actividades diarias, y un territorio. El dominio vital tiene unos límites flexibles, no defendidos, de manera que los dominios vitales de animales o grupos distintos pueden superponerse considerablemente. Un territorio, en cambio, se define como aquella zona que un individuo o grupo ocupa hasta la exclusión casi completa de otros animales de la misma especie y que defenderá activamente contra ellos. En algunas regiones geográficas los coyotes defienden claramente su territorio frente a otros animales, pero en otras regiones no se tienen pruebas de que sean territorialistas. Nuestros datos indican que sólo los coyotes en manada son territorialistas; los individuos que tienen un dominio vital fijo pero viven solos o en parejas apareadas, no lo son. Considérense los dos grupos de coyotes que observamos en la zona de Blacktail Butte.

Los cuatro miembros del grupo *B* mantenían como grupo un territorio con fronteras rigurosas entre ellos y el grupo *A*, la pareja. Asimismo, expulsaban de su territorio a otros muchos coyotes, a veces persiguiendo a un intruso a lo largo de hasta dos o tres kilómetros. (En abril de 1979 vimos a la hembra reproductora de la manada perseguir durante un kilómetro a un coyote intruso, sólo unos pocos días después de que ésta hubiera parido una camada; cuando volvió al cubil, su pareja persiguió al intruso a lo largo de otros tres kilómetros.) Por otra parte, nunca vimos a los dos miembros del grupo *A* defendiendo una parte de su dominio vital frente a ningún otro coyote. De estos hallazgos, que han sido confirmados por los de otros investigadores, se desprende que la intensidad con que se defiende una zona por parte de individuos o de grupos está relacionada con la presencia de recursos alimentarios amplios y agrupados.

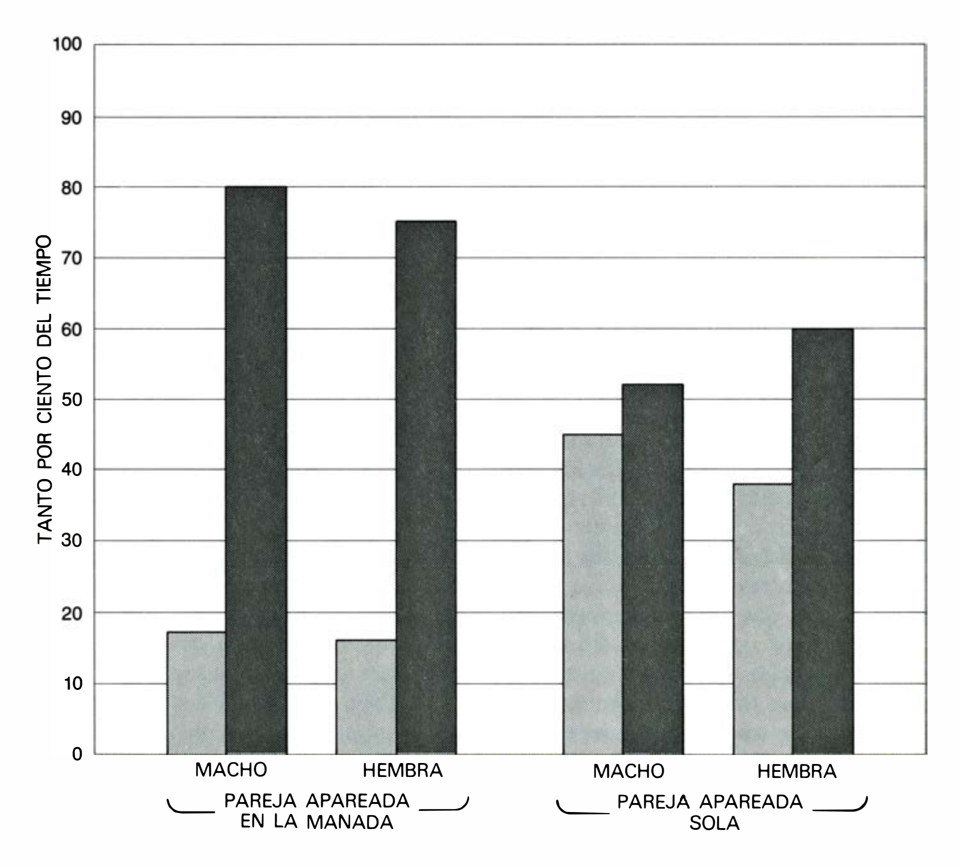
También encontramos que una escasez de alimento desencadena claramente un aumento de las incursiones en los dominios vitales y territorios vecinos, en particular aquéllos en los que puede hallarse el alimento deseado. Por ejemplo, aunque el grupo *A*, la pareja, realizaba correrías frecuentes en el territorio defendido por el grupo *B*, no se pudo observar a ningún miembro de este grupo efectuando incursiones en el dominio vital del grupo *A*. De hecho, los miembros de la manada raramente abandonaban

su propio territorio, lo que no es sorprendente si se considera la abundancia de carroña de ungulados en él.

El tamaño de los dominios vitales y de los territorios de los coyotes varía mucho, aunque no de una manera consistente, con la localidad, la estación y el año, y también con la edad y el sexo de los individuos. Cuando medimos los dominios vitales de 10 adultos en la zona de Blacktail Butte, encontramos que el tamaño medio era de 21,1 kilómetros cuadrados, sin diferencias apreciables en razón del sexo. No obstante, cuando clasificamos el tamaño de los dominios vitales según las agrupaciones sociales de los coyotes, descubrimos que los individuos solitarios y las parejas apareadas, que resultan excluidos de la carroña en invierno, poseen un dominio vital mayor, con un tamaño medio de 30,1 kilómetros cuadrados. Los miembros de una manada, que en invierno defienden un recurso alimentario y tienden a permanecer en su propio territorio, tienen un dominio vital medio de sólo 14,3 kilómetros cuadrados. Asimismo, el tamaño de los dominios vitales de los miembros de una manada muestra mucha menos variación, probablemente debido a la distribución agrupada de la carroña de ungulados.

Vivir en manada confiere ventajas no sólo en la defensa de los recursos alimentarios frente a los competidores, sino también en las actividades reproductoras. Los coyotes suelen aparearse en el período que va de enero a abril, variando la fecha de una localidad a otra. La tasa de gravidez de la hembra, su productividad y la tasa de supervivencia de sus cachorros están en clara relación con el estado general de su salud, que a su vez se halla estrechamente ligado a la cantidad y calidad del alimento de que dispone antes y durante la preñez, es decir, al suministro de alimento durante el invierno. Por tanto, la facilidad creciente con la que los miembros de la jauría suelen localizar el alimento puede representar una importante ventaja reproductora. Además, cuando examinamos el tiempo que los coyotes invierten en otros tipos de actividad en invierno y verano hicimos un descubrimiento interesante.

Típicamente, los coyotes son activos por la mañana temprano y al atardecer, pero cuando comparamos el tiempo que 50 coyotes (35 de ellos marcados) dedicaban a cazar y a descansar, encontramos que en invierno, cuando disponen de carroña, pero en que la cantidad de alimento suele ser reducida, pasaban mucho menos tiempo cazando y mucho más descansando que en verano, época en la que disponen de mayor cantidad de pequeños roedores, que, no obstante, hay que buscar, capturar y matar. La relación más alta de tiempo de descanso a tiempo de caza puede ser generalmente beneficiosa para las hembras preñadas, que deben conservar energías para los requerimientos nutritivos a que se ven sometidas durante el período de gestación, de nueve semanas, y posteriormente. (Hay seis cachorros en una camada media de coyote, y al nacer son altrices, o dependientes, es decir, requieren ser alimentados y protegidos durante los primeros meses de vida.) Si las hembras que viven en una manada pueden pasar más tiempo descansando que las que viven solas con su pareja, entonces las hembras de una manada pueden reproducirse con más éxito. Además, como hemos señalado, las hembras que viven en una manada tienen más probabilidades de recibir ayuda a la hora de criar a su descendencia.



LA HEMBRA APAREADA DE UNA MANADA pasa significativamente más tiempo descansando (*gris oscuro*) y significativamente menos tiempo viajando (*gris claro*) en invierno que una hembra que viva sola con su pareja, como demuestra este gráfico que compara estas actividades para el macho y la hembra reproductores del grupo *A* (la pareja apareada) y del grupo *B* (la manada) en las cercanías de Blacktail Butte. Aunque no se ha observado que las hembras que viven en manadas se reproduzcan con más éxito que las otras, parece que si el alimento deviene un factor limitante, el sustancial ahorro neto de energía de las hembras que viven en la manada puede conferirles una ventaja reproductora.

Nuestros hallazgos acerca de la adaptación de los coyotes a vivir en manadas vienen apoyados por datos obtenidos sobre los chacales dorados y las hienas, y hemos podido obtener algunas conclusiones generales que deben comprobarse en otras especies de carnívoros. Hemos encontrado que en situaciones en las que hay "ricos" y "pobres" con respecto al suministro de alimentos en invierno (es decir, individuos que viven en una zona en la que un recurso alimentario es amplio y se halla agrupado en contraposición a individuos que viven en una en la que los recursos son escasos), los ricos: (1) son más sociables y se muestran más unidos que los pobres, (2) son territorialistas y defienden los recursos alimentarios, (3) tienen un dominio vital más restringido, (4) están sujetos a mayores tasas de intrusión por parte de los miembros de la misma especie en las zonas en las que el alimento está agrupado y (5) en invierno pueden desplazarse menos y, en consecuencia, descansar más. Y las ventajas de vivir en manada pueden consistir en cualesquiera de las que siguen: (1) el alimento puede defenderse con más éxito, sobre todo, en invierno; (2) se pueden localizar más rápidamente los alimentos; (3) los individuos, en particular las hembras se-

xualmente maduras, pueden conservar la energía que precisan para la reproducción y el cuidado de las crías y (4) los jóvenes pueden ser objeto de ayuda, en forma de alimento y protección, por parte de individuos distintos de los padres (más probablemente, hermanos mayores). No está todavía claro si vivir en una manada confiere una ventaja en la adquisición de presas grandes.

Hasta aquí hemos comentado sobre todo la adaptación a los recursos alimentarios defendibles que representa vivir en manada, pero la vida en solitario constituye también una adaptación a un recurso alimentario determinado. Para los coyotes que observamos desde Blacktail Butte, el recurso son los roedores, es decir, presas que los coyotes no pueden defender frente a otros coyotes y que son difíciles de compartir, como no sea con los cachorros. Nuestros estudios han demostrado que incluso los coyotes que viven en grupos de gran cohesión se vuelven temporalmente solitarios cuando están cazando roedores. De ahí que, del mismo modo que es importante estudiar las distintas pautas de comportamiento asociadas con la defensa de grupo del territorio y del alimento, también lo es estudiar las diversas pautas de comportamiento asociadas con la depredación en solitario. No se sabe mucho acerca de la manera en que los coyotes salvajes localizan y capturan a las presas, pero hemos realizado algunos experimentos con el fin de intentar esclarecer este tipo de comportamiento.

Para empezar, el proceso mediante el cual un depredador cualquiera localiza a la presa es complejo, y distintas especies de carnívoros realizan esta tarea de modo muy diferente. Los estímulos visuales, auditivos y olfativos tienen una notable incidencia, y en la naturaleza probablemente interactúan para producir la respuesta del depredador frente a la presa. Sin embargo, conviene determinar la importancia relativa de estos tres tipos de estímulos para los coyotes, e intentar relacionar estos hallazgos con la historia natural de la especie. Los experimentos que se requieren con este fin se realizan mejor con coyotes cautivos, en condiciones que permiten controlar de forma rigurosa los estímulos procedentes del exterior.

En el primer conjunto de experimentos, realizados en la Universidad estatal de Colorado en colaboración con Philip N. Lehner, se encerraron coyotes en una pequeña habitación de 30 metros cuadrados que tenía un conejo escondido. Se midió el tiempo que cada uno de los coyotes tardaba en localizar el conejo con todas las combinaciones posibles de los tres tipos de estímulos. Se suprimían los estímulos visuales eliminando toda luz de la habitación (en cuyo caso se seguían los movimientos de los coyotes mediante cinematografía infrarroja); los estímulos auditivos se eliminaban utilizando un conejo muerto y, los estímulos olfativos, insuflando un olor enmascarador en la habitación (los olores de una colonia de conejos) o bien irrigando las membranas mucosas nasales de los coyotes con una solución de sulfato de cinc.

Los resultados de los experimentos demostraron que cuando existían señales visuales, la ausencia de las auditivas u olfativas producía únicamente cambios menores en la duración de la búsqueda que el coyote hacía de la presa. Por ejemplo, cuando llegaban los tres tipos de estímulos, el tiempo medio de búsqueda era de 4,4 segundos; cuando sólo se disponía de señales visuales, la cifra se elevaba únicamente a 5,6 segundos. Cuando se eliminaban las señales visuales y existían sólo las olfativas o auditivas, el tiempo medio de búsqueda se elevó a unos 36,1 segundos, es decir, ocho veces la duración con los tres tipos de estímulos juntos. Cuando sólo había señales auditivas, el tiempo de búsqueda se reducía ligeramente, hasta una media de 28,8 segundos; cuando sólo había señales olfativas, subía hasta 81,1 segundos. Cuando se suprimían los tres tipos de estímulo, a los coyotes les suponía una media de 154,8 segundos, es decir, más de 2,5 minutos, encontrar la presa mediante el tacto.

Así, bajo estas condiciones experimentales, los sentidos que facilitan la localización de la presa en el coyote son, en orden decreciente de importancia, la vista, el oído y el olfato. El hecho de que la visión es de vital importancia se ve confirmado por los resultados de otra serie de experimentos en los que se presentaba simultáneamente, a los coyotes, un conejo escondido que hacía ruido (respirando, susurrando, etcétera) y un conejo visible que no lo hacía. Sin excepción, los conejos visibles eran capturados en primer lugar. Es probable que los coyotes evolucionaran en llanuras abiertas y cubiertas con hierbas de poca altura, de manera que las presas eran muy visibles. El hecho de que fíen tanto en la vista quizá sea resultado de la adaptación a este hábitat.

Con el fin de reproducir con más fidelidad el ambiente de caza natural del coyote, se realizó un serie de experimentos similares al aire libre, en una gran zona vallada (6400 metros cuadrados) en el Maxwell Ranch, que posee la Universidad estatal de Colorado. Al ser mayor la zona de búsqueda, así como el número de factores de distracción, los tiempos medios de búsqueda al aire libre, fueron todos superiores, pero también aquí la vista resultó ser el sentido más importante a la hora de localizar a la presa. Al aire libre, sin embargo, el olfato mostraba una eficacia mayor que el oído: los coyotes podían encontrar a los conejos más rápidamente con señales visuales y olfativas (necesitaban entonces un tiempo medio de 34,5 segundos) que cuando tenían señales visuales y auditivas (entonces precisaban un tiempo medio de 43,7 segundos). De forma parecida, cuando sólo recibían estímulos olfativos los coyotes requerían una media de 72,7 segundos para localizar a la presa, y con sólo estímulos auditivos el tiempo medio de búsqueda se elevaba a 208,8 segundos. Cuando existían a la vez los tres tipos de estímulos, el tiempo medio de búsqueda era de 30,1 segundos; cuando se suprimían los tres tipos, la media aumentaba hasta unos 22,2 minutos.

Las diferencias entre los experimentos realizados en un lugar cerrado y los que lo fueron al aire libre pueden explicarse teniendo en cuenta los efectos del viento. Los estímulos olfativos transportados por el aire son, evidentemente, señales directivas importantes para un coyote que caza, como se desprende del hecho de que al aire libre, donde el olfato predominaba sobre el oído, el 83,9 por ciento (47 de 56) de los acercamientos al conejo se hicieron contra el viento. De forma parecida, en nuestra localidad de estudio en el Parque Nacional Grand Teton encontramos que el 74,9 por ciento de todos los acercamientos que observamos que los coyotes salvajes efectuaban hacia los ratones, se hacían desde el lado de sotavento. Además, en los experimentos al aire libre en que los coyotes sólo disponían de señales olfativas, se observó una correlación significativa entre la velocidad del viento y la distancia de acercamiento, es decir, la distancia a la que un coyote que está cazando se da cuenta de la localización de su presa. Para ser más precisos, al aumentar la velocidad del viento también lo hacía la distancia de acercamiento, de modo que cuando el viento avanzaba a 10 kilómetros por hora, la distancia de acercamiento era de unos dos metros, mientras que cuando el viento soplaba a 40 kilómetros por hora

la distancia de acercamiento subía a unos cinco metros.

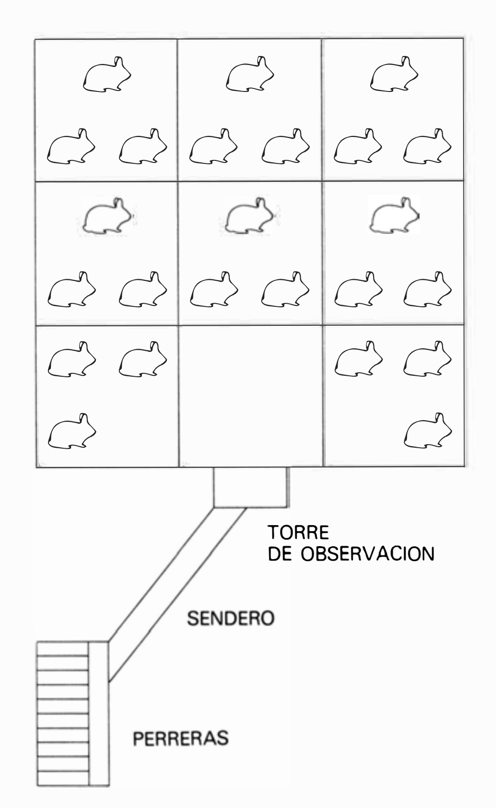
De ahí que, aunque se diría que depende sustancialmente de la vista cuando caza, parece disponer de sistemas de apoyo eficaces en los que fiar cuando faltan determinados tipos de señales o son inadecuados. Si las presas se dejan ver, es probable que se inicie la persecución basada en señales visuales antes de que las señales olfativas o auditivas puedan entrar en juego; pero cuando la presa está bien escondida, el coyote recurre, con seguridad, a una determinada combinación de señales olfativas y auditivas. (La combinación exacta depende quizá de las condiciones del viento y de la cantidad de ruido que hace la presa.) Los coyotes son depredadores muy eficientes y es evidente que pueden pasar de uno a otro de estos distintos modos de caza, con el fin de obtener la máxima ventaja de cualesquiera que sean las condiciones ambientales en aquel momento dado.

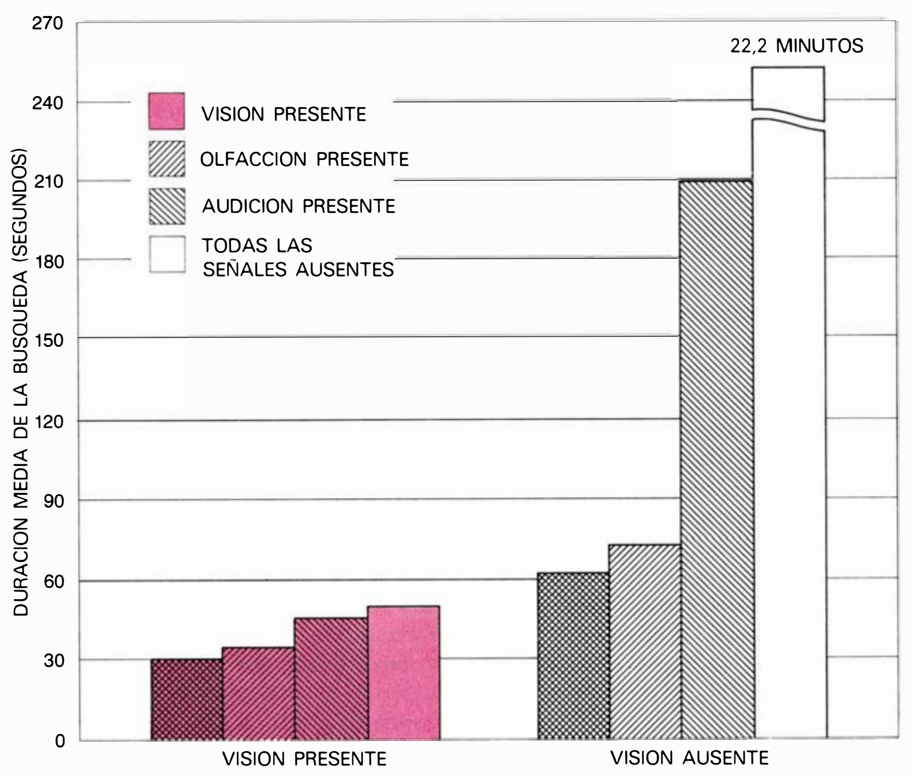
¿De qué modo mata el coyote a la presa que localiza? La información sobre este tema puede ser útil no sólo para los biólogos interesados en los aspectos comparados y evolutivos del comportamiento depredador, sino asimismo para aquellos preocupados por el control y la gestión de los depredadores. Aquí será adecuado distinguir entre los animales presa que son más pequeños que el coyote y aquéllos que son mayores que él. (Los coyotes hacen presa ocasionalmente en animales vivos grandes, aunque, a tenor de nuestras observaciones en la zona de Blacktail Butte, se trata de una forma de depredación rara.)

Hemos apreciado siete actividades distintas que pueden incluirse en el comportamiento depredador de un coyote cuando su presa es un animal pequeño, un roedor por ejemplo. Secuencialmente, son: búsqueda a distancia (el coyote atraviesa grandes zonas y escudriña la cubierta del suelo en busca de rastros de una presa), búsqueda cercana (husmea entre la cubierta del suelo), orientación (adopta una postura de alerta, quizás olisqueando o levantando las orejas para determinar la localización exacta de la presa detectada), acecho (en la que el coyote se acerca a su presa lenta y furtivamente), salto (se levanta primero sobre sus patas posteriores y después cae hacia delante sobre sus patas delanteras para sujetar a la presa contra el suelo), acometida (arremete rápidamente contra la presa) y, finalmente, muerte. Por lo general un coyote mata a un roedor mordiéndolo en la región de la cabeza, y en muchos casos el cánido también zarandea vigorosamente a la presa de un lado a otro.

Conviene saber que todas estas actividades no se dan siempre en una única secuencia de depredación. Así, nosotros encontramos que si la presa es un roedor más pequeño, como un ratón de campo, el coyote no suele arremeter contra el roedor; simplemente, lo acecha y salta sobre él, sujetándolo contra el suelo para asestarle un mordisco fatal. Sin embargo, cuando la presa es un roedor mayor, como una ardilla de tierra uinta o una ardilla de tierra de Richardson, los coyotes que observamos acometieron a la presa en más del 90 por ciento de los casos, y sólo en raras ocasiones saltaron.

El éxito de las secuencias de depredación del animal en la captura y la muerte de los roedores varía mucho. Se-





INSTALACION EXPERIMENTAL para determinar la importancia relativa de los sentidos de la vista, olfato y oído para la localización de la presa en los coyotes, representada a la izquierda. En todas las pruebas se sitúa un conejo al azar en cada una de 24 localizaciones posibles en un gran cercado al aire libre (6400 metros cuadrados); se deja entrar un coyote en el cercado y se registra el tiempo que tarda en encontrar el conejo. El procedimiento se repitió para cinco coyotes con todas las combinaciones posibles de los tres tipos de estímulos sensoriales presentes. Las señales visuales se eliminaron sometiendo los coyotes a prueba en una noche oscura (y observándolos a través de un dispositivo especial que intensifica la luz disponible); las señales auditivas se eliminaron utilizando como presa un conejo muerto, y las olfativas irrigando las membranas mucosas nasales del coyote con una solución de sulfato de cinc. A la derecha se indica el tiempo medio preciso para localizar las presas bajo cada condición. Los resultados de las pruebas con señales visuales presentes (*color*) se han separado de las que tenían las señales visuales suprimidas, y muestran que a la hora de localizar una presa el sentido más importante es la vista, y, el menor, el oído. Con sólo estímulos auditivos el tiempo medio de búsqueda se elevaba a 208,8 segundos.

gún nuestros datos, los coyotes tienen éxito del 10 al 50 por ciento de las veces. Todavía no hemos identificado todas las variables que influyen en la tasa de éxito, si bien las ardillas de tierra parecen ser más fáciles de capturar que los ratones. También puede ser importante el nivel de hambre de un coyote. Las observaciones en cautividad revelan que los coyotes saciados juegan con frecuencia con un roedor antes de matarlo y comérselo, y suele acontecer que el roedor se escape. En la naturaleza se han hecho observaciones similares.

Nos preocupaba saber si las capacidades depredadoras del coyote mejoraban con la edad. A tal fin, comparamos el tiempo que mueve jóvenes coyotes, de tres a seis meses de edad, y 15 adultos invertían en las actividades de búsqueda, orientación y acecho cuando se hallaban cazando ratones o ardillas de tierra. Resultó ser que los adultos pasaban menos tiempo buscando y orientándose, y además el tiempo que éstos dedicaban a tales actividades era mucho menos variable que el de los cachorros. Sin embargo, no había diferencia en el tiempo que pasaban al acecho, actividad a la que los coyotes de los dos grupos de edad dedicaban una media de 5,5 segundos. Así pues, los cachorros manifiestan una eficacia menor que los adultos en lo tocante a la localización de su presa, pero una vez ésta ha sido localizada los coyotes de ambos grupos de edad acechan brevemente y se aprestan luego a darle muerte. Los estudios de coyotes en cautividad revelan asimismo que los cachorros de sólo 30 días de edad son capaces de desarrollar con éxito una secuencia de depredación con un ratón. En otras palabras, aunque los coyotes de esa edad raramente tienen oportunidad de matar un pequeño roedor en la naturaleza, es evidente que poseen la capacidad de hacerlo.

Si nos ceñimos ahora al modo en que los coyotes matan grandes presas salvajes, como carneros, ciervos, uapitíes y alces, hay pocas observaciones de las que puedan obtenerse generalizaciones útiles. Y ello por varias razones. Para empezar, las muertes causadas por coyotes no se suelen poder distinguir de las que procuran otros depredadores salvajes o incluso los perros domésticos. Además, se ha señalado que la mayoría de ungulados sanos que viven en la misma localidad que los coyotes son capaces de defenderse frente a un coyote único, de manera que los ejemplos de este tipo de depredación son raros y por tanto difíciles de observar. Los pocos datos que existen indican que para derribar, por ejemplo, a un ciervo adulto sano hacen falta, por lo general, dos o más coyotes. En la mayoría de casos estos cánidos parecen matar ungulados jóvenes o débiles, atacando típicamente la cabeza, el cuello, el vientre y la grupa. Se cree que los coyotes no ejercen ningún efecto perjudicial significativo sobre las poblaciones de ungulados salvajes.

Menos claros son los efectos de la depredación de los coyotes sobre las ovejas domésticas. Ello nos lleva a un aspecto más controvertido de la biología del coyote, a saber, la gestión y el control de estos mamíferos. Se dice de ellos que tienen un efecto perjudicial importante sobre la industria ganadera ovina, y como resultado, a lo largo de un siglo los coyotes se convirtieron en el blanco particular de los programas de control de depredadores. En la actualidad se dedican a estos esfuerzos grandes cantidades de tiempo, energía y dinero (en muchos casos procedentes del erario público). Los beneficios de esta inversión son pequeños, tanto en términos de la reducción de la población de coyotes como de la prevención de las pérdidas y daños al ganado. El fracaso de los programas de control y gestión se debe esencialmente a la falta de una información de base suficiente sobre la dinámica del comportamiento y de la población de los coyotes.

De hecho, se sabe muy poco acerca de las costumbres depredadoras de los coyotes salvajes con respecto a las ovejas domésticas. Guy Connolly y sus colegas del Fish and Wildlife Service de los Estados Unidos han encontrado que, aunque los coyotes se hallen encerrados junto a ovejas, su comportamiento depredador es sorprendentemente ineficaz. En estos experimentos los coyotes mataron a las ovejas en sólo 20 de 38 encuentros. Además, el tiempo medio que pasaba antes de que los coyotes atacaran a las ovejas (47 minutos) y el tiempo medio transcurrido hasta que éstas caían muertas (13 minutos) eran muy largos, sumando una hora. El comportamiento defensivo de las ovejas disuadió a los coyotes en sólo el 31,6 por ciento de los casos, lo que explica que los coyotes se tomaran su tiempo antes de matar a las ovejas. No hay ejemplos de esta depredación ineficiente en las interacciones depredador-presa en la naturaleza, donde la presa o bien huye o bien lucha para mantener alejado al depredador mientras puede. Sin embargo, es evidente que las ovejas, que se han visto sometidas a una selección artificial por parte de este gran domesticador que es el *Homo sapiens*, han sido dejadas prácticamente indefensas frente a la depredación.

Así pues, los coyotes matan ovejas, demás ganado y volatería domésticos. No obstante, muchos estudios han demostrado que otros factores que no son la depredación por parte de los coyotes pueden causar pérdidas considerablemente más cuantiosas. En un estudio reciente se señalaba que, en los primeros años de la década de 1970, el valor de las pérdidas de ovejas hembras y corderos en Idaho era de 2.343.438 dólares. De este total, el 36 por ciento podía atribuirse a enfermedad, el 30 por ciento a causas no determinadas y el 34 por ciento a depredación; sólo el 14,3 por ciento de las pérdidas podía asignarse a depredación por coyotes. Además, hay datos que indican que no todos los coyote matan ovejas, y que eliminar indiscriminadamente a estos cánidos en zonas donde mueren ovejas constituye un método de control ineficaz. Un estudio reciente de la depredación del ganado doméstico en 15 estados occidentales de los Estados Unidos, llevado a término por el Animal Damage Control Program del Departamento del Interior, concluyó que la relación entre esta depredación y la dinámica de poblaciones de los coyotes no estaba clara.

En cierto sentido el coyote resulta víctima de su éxito: se ve amenazado porque saca partido de ganado al que se ha desposeído de la mayor parte de sus defensas por prácticas de domesticación miopes. Es de esperar que en el futuro se devuelva, mediante selección, el comportamiento defensivo al ganado doméstico. Por el momento se puede suponer únicamente que el fracaso del control de depredación obedece a la falta de conocimientos básicos acerca de las especies depredadoras, problema que puede remediarse mediante ulteriores estudios sobre el comportamiento y la ecología del tipo de los que aquí se han descrito.

El coyote es un sujeto particularmente indicado para estas investigaciones. Se necesitará más trabajo de campo para determinar hasta qué extremo nuestros descubrimientos pueden aplicarse a otras poblaciones de coyotes, a especies estrechamente emparentadas y a los carnívoros en general. Mientras tanto, los coyotes deben ser apreciados como animales que se han adaptado extraordinariamente bien a las presiones que su ambiente les infiere, incluyendo el acosamiento por parte del hombre y la severa restricción de sus hábitats naturales.

Transporte de sustancias en las células nerviosas

Macromoléculas sintetizadas en el cuerpo celular recorren grandes distancias a través del axón en dirección a las terminaciones. Otras siguen el camino inverso para ser eliminadas o utilizadas en la síntesis de nuevas moléculas

James H. Schwartz

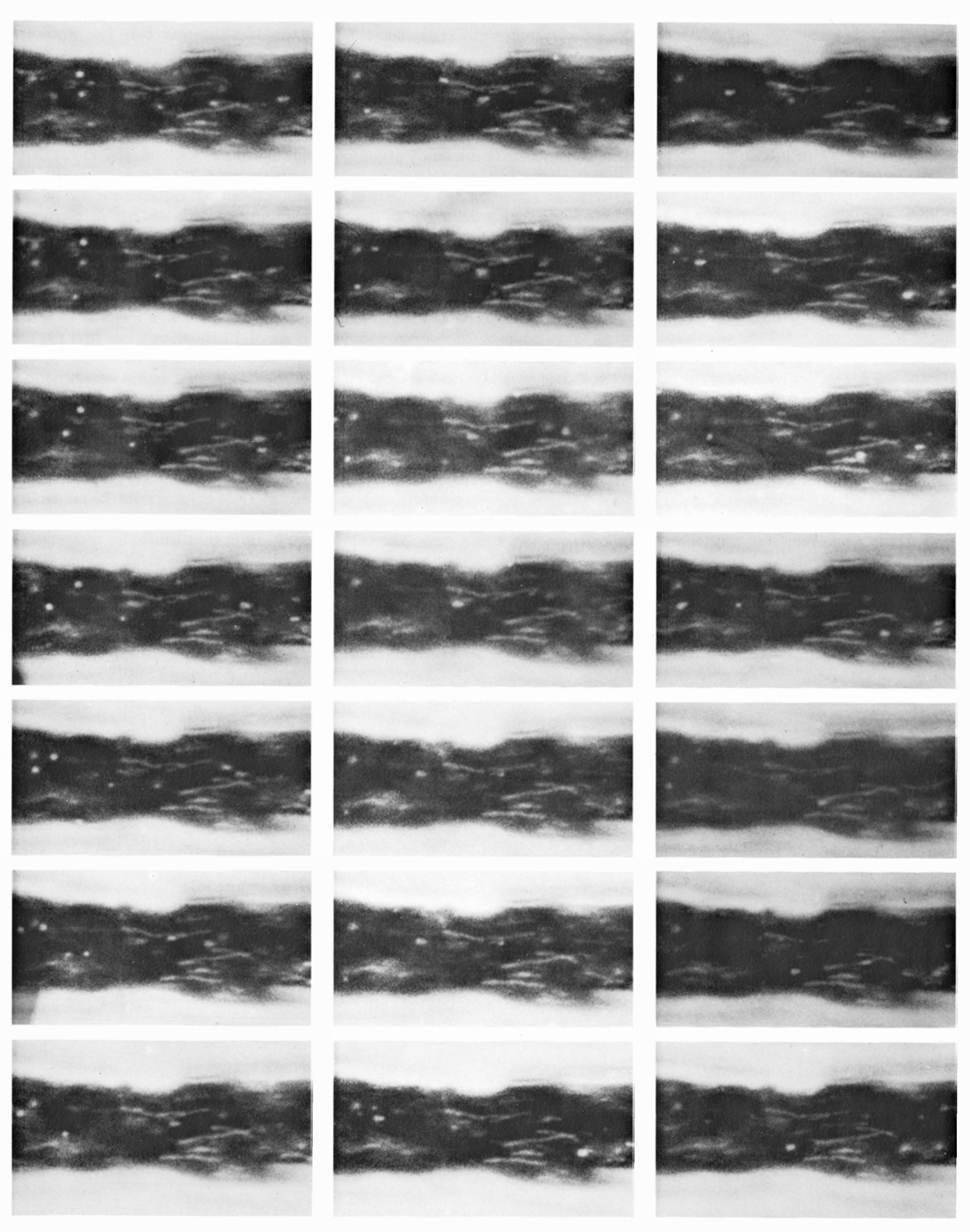
Galeno propuso, en la segunda centuria de nuestra era, que el cerebro regía el movimiento y las sensaciones mediante la secreción de un "pneuma" psíquico que circulaba a través de imperceptibles canales del interior de los nervios. Hasta el siglo XVIII se consideró el cerebro un órgano glandular; los nervios desempeñaban el papel de conductos a través de los cuales circulaba hacia la periferia el líquido segregado por el cerebro y la médula espinal. Galeno y sus seguidores estaban, desde luego, equivocados al atribuir la actividad nerviosa al flujo de sustancias a través de los nervios. El movimiento, las sensaciones y otras funciones nerviosas son la consecuencia de interacciones entre células nerviosas desencadenadas por señales eléctricas, transmitidas por la superficie de los axones o fibras nerviosas y no por su interior. Sin embargo, estaban en lo cierto al considerar que algo importante fluía realmente a través de los canales nerviosos. Ciertas sustancias elaboradas en el cuerpo de una célula nerviosa son transportadas por el axón hasta sus terminaciones. Recorren, pues, la luz o parte central de la fibra nerviosa y desempeñan un papel esencial en la actividad nerviosa.

Una neurona o célula nerviosa consta, esencialmente, de un cuerpo celular dotado de prolongaciones: muchas dendritas y, usualmente, una larga prolongación única, el axón, con ramificaciones que poseen terminaciones sinápticas. La llegada de un impulso eléctrico a las terminaciones provoca la liberación de moléculas de neurotransmisor almacenadas en numerosas vesículas de pequeño tamaño existentes en las terminaciones. El neurotransmisor difunde a través del estrecho espacio sináptico y actúa sobre receptores de las dendritas o del cuerpo celular de otras neuronas donde genera o inhibe un impulso eléctrico. La génesis y conducción de impulsos eléctricos, así como la síntesis y liberación de neurotransmisores, son procesos locales que no dependen directamente del cuerpo celular.

El cuerpo celular es fundamental, sin embargo, para la síntesis de muchos materiales esenciales para mantener la vida de la célula y ejercer sus diversas funciones. Entre estos materiales merecen especial mención las membranas que forman el axolema (la membrana externa del axón) y las terminaciones y vesículas sinápticas. Se han desarrollado complejos sistemas de transporte para acarrear dichos materiales a lo largo del axón, desde el cuerpo celular hasta las terminaciones, y para realizar el recorrido inverso, transportando sustancias desde las terminaciones hasta el cuerpo celular, donde son utilizadas como material de partida para nuevas síntesis. Existen dos tipos de transporte intracelular: el tipo lento, denominado flujo axoplásmico, y el rápido, denominado transporte axónico. El flujo axoplásmico acarrea materiales únicamente desde el cuerpo celular hasta las terminaciones de las fibras nerviosas. El transporte axónico tiene lugar en ambos sentidos. Los dos procesos difieren en muchos otros aspectos, entre ellos en su mecanismo básico y en la clase de materiales que transportan.

El transporte lento se descubrió en primer lugar. Los planteamientos que condujeron a su descubrimiento procedían del campo de la biología del desarrollo, estando relacionados con el mecanismo a través del cual las neuronas adquieren una morfología determinada. Al comienzo de su desarrollo, las células nerviosas son esencialmente esféricas y están desprovistas de prolongaciones, pero su forma cambia rápidamente cuando emergen de la neurona el axón y las dendritas. En las células maduras, el axón y sus terminaciones contienen un volumen de material cientos y miles de veces mayor que el correspondiente a los cuerpos neuronales. Resulta difícil dar un valor con aplicación general, puesto que la morfología de las neuronas varía extraordinariamente, posiblemente más que la de cualquier otra célula del organismo. Algunas neuronas tienen axones cortos que se extienden sólo a distancias equivalentes a varios diámetros del cuerpo neuronal; otras carecen en absoluto de axones, pero ello no es habitual. En el otro extremo, y con bastante frecuencia, las neuronas poseen axones cuya longitud equivale a miles de veces el diámetro del cuerpo celular. Por ejemplo, un axón del nervio frénico de una jirafa se extiende desde su cuerpo celular, en el tronco cerebral, cerca de la base del cráneo, hasta sus terminaciones que establecen sinápsis con los músculos del diafragma, metro y medio a dos metros por debajo. El axón de una neurona motora de la médula espinal que inerve un músculo del dedo del pie en una persona de 1,80 metros de altura tiene una longitud equivalente a 5000 diámetros celulares. Si el cuerpo celular de una neurona motora tuviera el tamaño de un balón de fútbol, su axón sería de una longitud equivalente a 15 campos de fútbol. Las investigaciones realizadas sobre la biología del desarrollo de la neurona han puesto de manifiesto que, durante el crecimiento del axón, el citoplasma debe fluir desde el cuerpo celular hasta la prolongación en desarrollo.

De forma similar, cuando seccionamos un axón en un animal adulto, vuelve a crecer, en determinadas condiciones, y el nuevo axoplasma (nombre

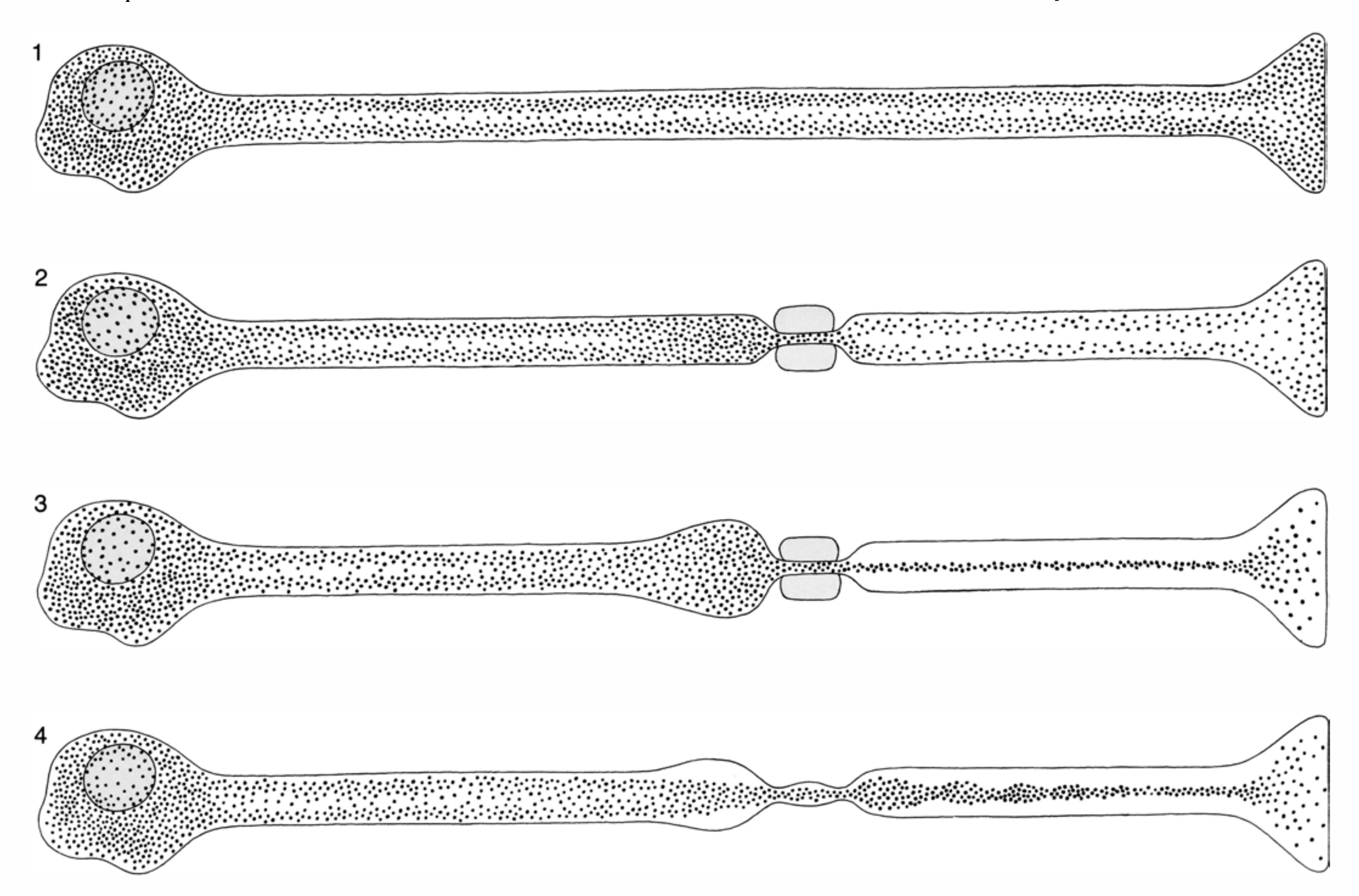


TRANSPORTE DE PARTICULAS hacia el cuerpo celular de una neurona perteneciente a una rana toro. El movimiento a través del axón, larga prolongación de la célula nerviosa, ha sido registrado cinematográficamente por David S. Forman, Ante L. Padjen y George R. Siggins, del Instituto Nacional de la Salud Mental. El movimiento tiene lugar de derecha a izquierda y se ha hecho visible mediante microscopía de campo oscuro. Las estructuras alargadas en forma de varilla son mitocondrias; aunque por regla general permanecen estacionarias, a veces se desplazan. Las estructuras redondas y elípticas son probablemente cuerpos multivesiculares y otras estructuras lisosómicas. Puede seguirse el movimiento de una determinada partícula, por ejemplo la partícula elíptica situada en la parte media y a la derecha del primer cuadro. Si nos fijamos en las columnas, de arriba abajo, observaremos que la partícula avanza (el movimiento tiene lugar por una serie de saltos), se detiene durante algún tiempo y por fin alcanza el punto límite y casi sale del marco de la figura. El diámetro externo del axón es de 17 micrometros. La neurona consta de cuerpo celular, dendritas y axón.

que recibe el citoplasma que llena el axón) fluye lentamente a lo largo de la fibra que experimenta el proceso de regeneración para establecer la conexión con el órgano efector. En experimentos realizados sobre nervios de conejo en regeneración, en los primeros años de la década de los 40, los biólogos británicos J. Z. Young y P. B. Medawar (instados en parte por la trascendencia médica de las lesiones nerviosas producidas durante la Segunda Guerra Mundial) determinaron la velocidad de crecimiento de las fibras en regeneración, que resultó ser de tres a cuatro milímetros diarios. A partir de estos experimentos y de otros similares llevados a cabo por distintos investigadores, se llegó a la conclusión de que existe un flujo axoplásmico que parte del cuerpo celular.

Fueron Paul A. Weiss y sus colaboradores, de la Universidad de Chicago, quienes, en 1948, demostraron por primera vez experimentalmente que sustancias originadas en el cuerpo celular se desplazaban a una velocidad constante a través del axón, partiendo del cuerpo celular. El procedimiento de Weiss consistió en constreñir quirúrgicamente las ramas del nervio ciático en ratas, pollos y monos. Inmediatamente después de la operación, el examen microscópico de las fibras individuales no mostraba alteraciones del axón en la región proximal de la constricción (entre ésta y el cuerpo celular). Varias semanas después, las observaciones revelaron un cambio dramático en la forma del axón: la región proximal a la constricción había experimentado una considerable tumefacción, sugiriendo un acúmulo del axoplasma en la región proximal al bloqueo. Además, tal como ya habían observado otros investigadores en nervios seccionados, la porción distal del axón respecto a la constricción (más allá del bloqueo) había degenerado. Weiss procedió entonces a eliminar la constricción y cronometró la velocidad de desplazamiento del material acumulado durante las semanas que había durado el bloqueo. Observó que el axoplasma acumulado progresaba a lo largo de las fibras en regeneración a una velocidad constante, comprendida entre uno y dos milímetros diarios. Dichos valores concordaban básicamente con los obtenidos por Young y Medawar al medir las velocidades de regeneración.

Los experimentos de Weiss fueron oportunos puesto que, en los años subsiguientes, los biólogos moleculares emprendieron las investigaciones que conducirían al esclarecimiento de los mecanismos de la síntesis de proteínas. Tales investigaciones pusieron claramente de manifiesto por qué el axoplasma debía originarse en el cuerpo celular. En efecto, el cuerpo celular contiene el núcleo con el material genético, el ADN. El citoplasma que rodea al núcleo es la única región de la neurona que posee toda la maquinaria celular necesaria para la síntesis de proteínas. Los ribosomas y otras estructuras necesarias para la síntesis de proteínas y su ensamblaje en orgánulos celulares están localizados únicamente en el cuerpo celular y en las regiones proximales de las dendritas, pero no se hallan presentes en el axón. En consecuencia, las proteínas no pueden sintetizarse en el axón y prácticamente tampoco en las dendritas.

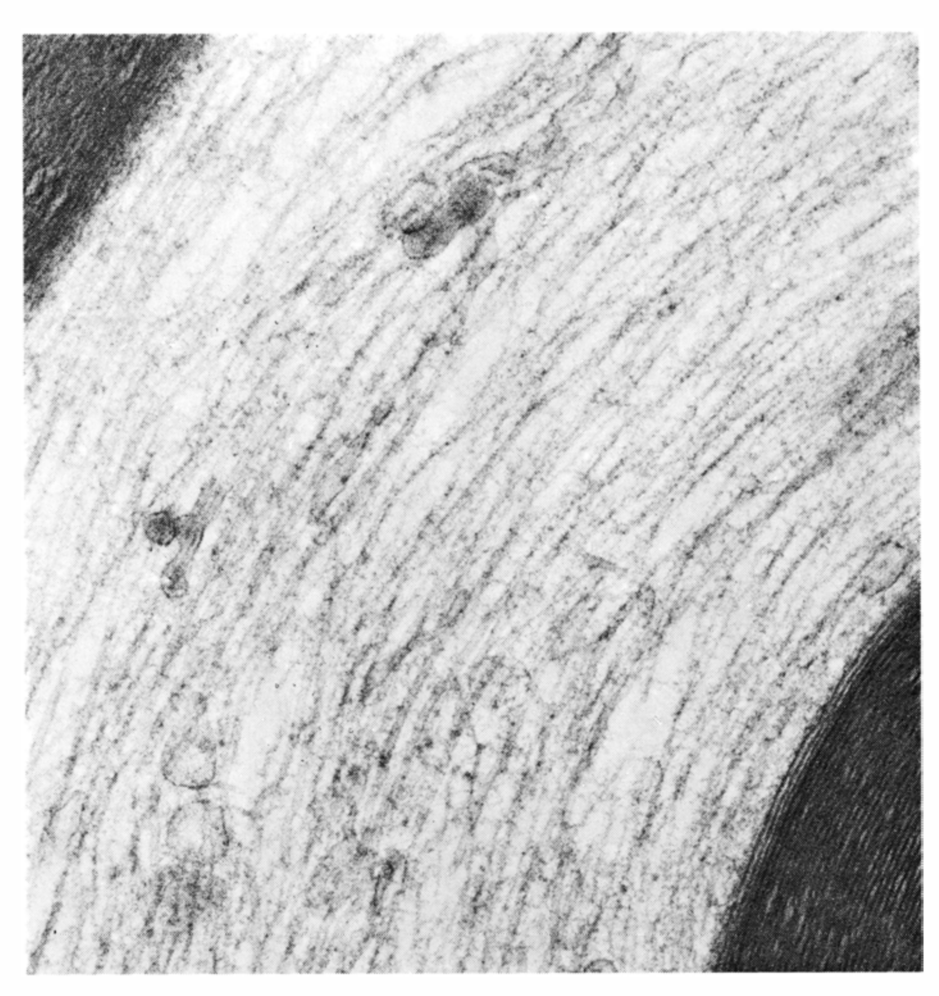


EXPERIMENTO DE CONSTRICCION realizado por Paul A. Weiss y colaboradores, de la Universidad de Chicago en 1948, en el que se demuestra que el material procedente del cuerpo celular de la neurona se desplaza a lo largo del axón a una velocidad constante. El experimento se muestra en la figura esquemáticamente para una sola fibra nerviosa madura (*1*), con el cuerpo celular a la izquierda y el axón que lo abandona dirigiéndose a la terminación nerviosa a la derecha. Se aplicó a la fibra un manguito constrictor (*2*). Al cabo de varias semanas, el axón experimentó una dilatación delante de la constricción (*3*) y una disminución de tamaño por detrás, lo que evidenciaba que el axoplasma (el material del cuerpo celular) se había estancado a consecuencia de la constricción. El axoplasma fluyó de nuevo (*4*) al quitar el manguito. (El diseño gráfico se debe a Alan D. Iselin.)

El axoplasma, al igual que el citoplasma de otras células, tiene un gran número y variedad de constituyentes. Las proteínas representan alrededor del 80 por ciento del peso seco del axoplasma, correspondiendo el resto a los lípidos (grasas) y azúcares. Miles de proteínas distintas se encuentran en diferentes estados: unas libres, disueltas en el axoplasma, otras incrustadas en la materia lipídica de las membranas y otras formando largas fibras filiformes. A pesar de su complejidad química, más del 20 por ciento del contenido proteico en peso está constituido por sólo tres proteínas: microtúbulos, neurofilamentos y microfilamentos. Cada una de ellas es un polímero lineal, un conjunto de pequeños monómeros (subunidades proteicas), que se repiten.

Los microtúbulos están constituidos por dos subunidades similares denominadas alfa y beta tubulina. Desde que fueron descritos por primera vez por Keith R. Porter en el Instituto Rockefeller de Investigación Médica, han sido observados en el citoplasma de la mayoría de las células y en los cilios, las proyecciones que flanquean algunos tipos celulares. Los neurofilamentos, estudiados en primer lugar por Peter F. Davison, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, contienen, según se ha demostrado recientemente, tres subunidades proteicas diferentes. Los neurofilamentos son similares morfológicamente a los que en otras células se han denominado filamentos "intermedios" Tanto los microtúbulos como los neurofilamentos, extremadamente largos, están orientados longitudinalmente, paralelos al eje mayor de los axones.

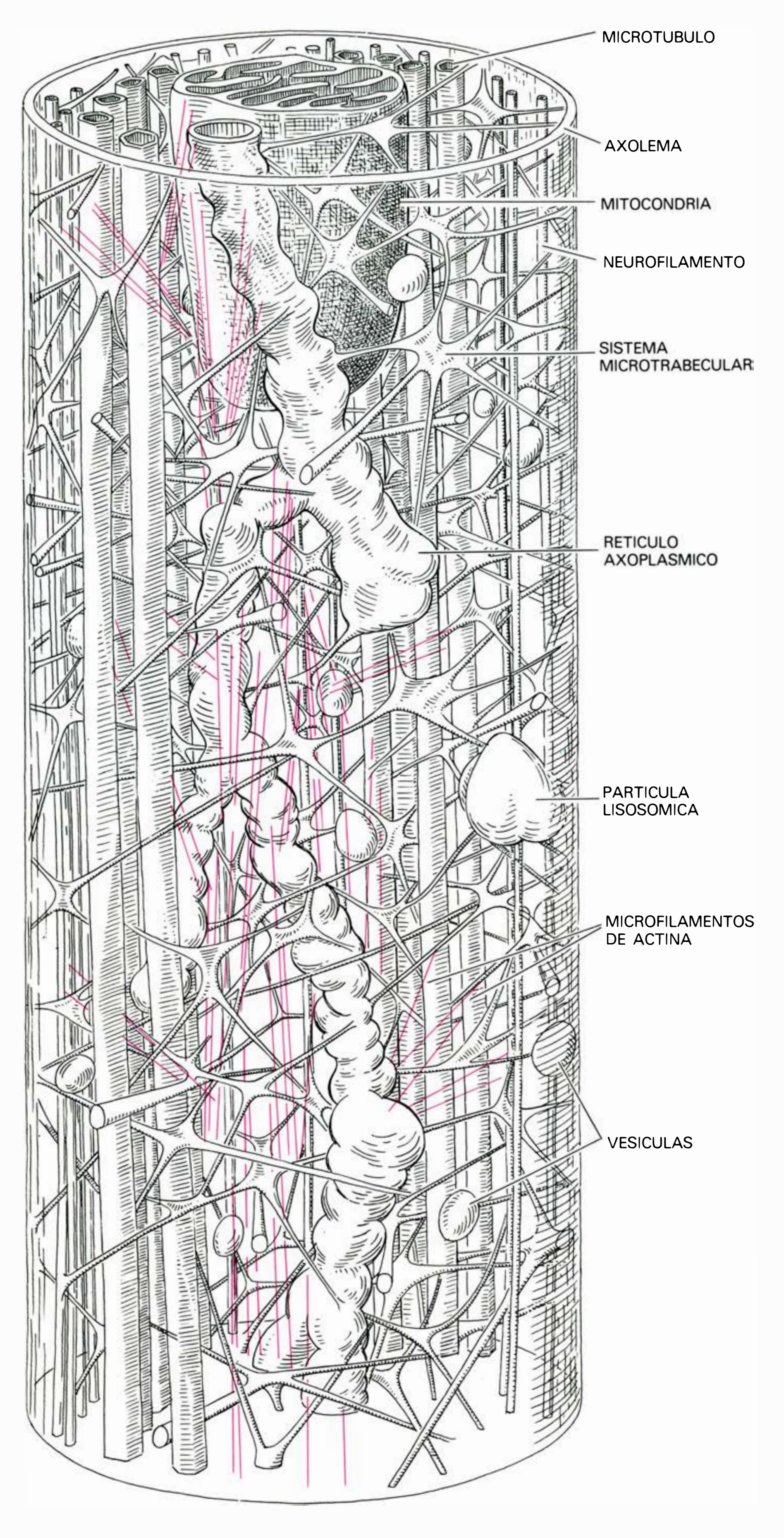
Los microfilamentos son más cortos. Se trata de polímeros de la actina neuronal, químicamente similar, pero no idéntica, a la actina muscular, una de las principales proteínas contráctiles del músculo. La actina fue extraída por primera vez del tejido nervioso, a través de métodos bioquímicos, por Soll Berl y Saul Puszkin, de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia. Los microfilamentos de los axones están constituidos por actina, según demostraron Yvi J. LeBeux y Joan Willemont, de la Universidad Laval de Quebec. Si bien se sabe, desde hace más de cuarenta años, que la actina y otras proteínas contráctiles constituyen la base del movimiento en los músculos, sólo recientemente se ha demostrado que se trata de importantes constituyentes de otros tipos celulares [véase "La base molecular del movimiento celular", por Elias Lazarides y Jean Paul Revel; INVESTIGACION Y CIENCIA, julio, 1979]. En los axones, los microfilamentos están dispuestos longitudinal y circunferencialmente y, a menudo, parecen estar asociados con el axolema.



EL AXOPLASMA aparece con un aumento de 62.000 diámetros en esta micrografía de alto voltaje de un nervio de rata obtenida por Mark H. Ellisman, de la Universidad de California en San Diego. Se distinguen cisternas y vesículas (cuerpos redondos y elípticos) y microtúbulos y neurofilamentos (más largos y, respectivamente, tubulares y con forma de cuerdas) que originan el sistema microtrabecular.

Los tres tipos de proteínas filamentosas se desplazan del cuerpo celular al axón siguiendo el flujo axoplásmico lento. Raymond J. Lasek, de la Case Western Reserve University, y Masanori Kurokawa, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Tokyo, han estudiado el movimiento de microtúbulos, neurofilamentos y microfilamentos en células ganglionares de la raíz dorsal. Los ganglios dorsales son grupos de neuronas situados en pares simétricos en cada nivel vertebral a lo largo de toda la médula espinal. A nivel de la parte inferior de la espalda, los ganglios contienen cuerpos celulares con un largo axón periférico que sigue el nervio ciático en dirección a la extremidad inferior y con una rama más corta central que entra en la médula espinal. Ambos, el axón periférico y la corta rama central, conducen información sensitiva desde la extremidad inferior al sistema nervioso central.

El ganglio de la raíz dorsal de un animal de experimentación puede ponerse al descubierto quirúrgicamente; al serle inyectado un aminoácido marcado, este se incorporará en las proteínas sintetizadas en el cuerpo celular de las neuronas. La incorporación sólo tiene lugar durante un breve período de tiempo después de la inyección, y los aminoácidos no incorporados se pierden rápidamente en la corriente sanguínea. Los animales se mantienen vivos durante una semana después de la inyección para permitir el transporte de las proteínas marcadas; a continuación se van sacrificando con intervalos de una semana y se separan los ganglios espinales que habían sido inyectados junto con sus nervios central y periférico. Se cortan los nervios que contienen los axones en segmentos consecutivos de seis milímetros de longitud. Las proteínas marcadas de cada segmento se analizan por electroforesis en presencia de detergente. El detergente



ESTRUCTURA INTERNA de un axón según las hipótesis actuales. Las trabéculas finas forman una matriz que proporciona al interior del axón la consistencia de un gel. Las vesículas, lisosomas y partículas similares se desplazan a través del axón tal como lo hacen en menor medida las mitocondrias. Los microfilamentos y los microtúbulos intervendrían, a su vez, en el transporte axónico rápido.

disocia los filamentos en subunidades que se separan electroforéticamente de acuerdo con su tamaño. Las principales proteínas de cada segmento del axón pueden reconocerse fácilmente por su patrón electroforético y las bandas radiactivas pueden cortarse para determinar la radiactividad.

Lasek y Kurokawa observaron que los tres polímeros fibrilares –las proteínas de los neurofilamentos, las dos tubulinas y la actina– constituían alrededor del 80 por ciento del total de las proteínas que se desplazaban mediante el transporte lento. El 20 por ciento restante estaba constituido por proteínas heterogéneas; consistía fundamentalmente en todo tipo de enzimas solubles y, debido a su gran diversidad, ninguno de ellos aparecía como una banda prominente en el patrón electroforético. Las velocidades del movimiento de microtúbulos, neurofilamentos y microfilamentos podían determinarse entonces a partir del patrón de bandas obtenido en todos los segmentos axónicos de células ganglionares examinados en intervalos de tiempo consecutivos después del marcaje original. Los patrones electroforéticos de segmentos sucesivos constituían una serie de imágenes estáticas que, sin embargo, registraban un movimiento continuo (del mismo modo que al pasar rápidamente las páginas de algunos libros ilustrados infantiles se consigue una visión animada de la historia que relatan).

La velocidad del transporte lento parece estar diseñada a la medida de los requerimientos de cada axón particular. En las células de los ganglios de la raíz dorsal, las velocidades de flujo son de dos a tres veces mayores en el largo axón periférico que en el corto axón central. Un ingenioso experimento, realizado por Marion Murray, de la Universidad de Chicago, demostró que el flujo axoplásmico dependía de la longitud del axón. Murray trabajaba con el sistema óptico del lenguado, un pez aplanado en el que un nervio óptico tiene un tercio de la longitud del otro debido a que ambos ojos están situados al mismo lado de la cabeza del animal. Después de marcar las proteínas por inyección simultánea de ambos ojos, Murray demostró que el material que se desplazaba mediante el flujo axoplásmico alcanzaba al mismo tiempo las terminaciones de ambos nervios ópticos en el cerebro; ello venía a indicar que existía una velocidad mayor, de carácter compensador en el axón más largo.

El transporte lento en un axón en desarrollo o regeneración tiene por fina-

lidad aportar el nuevo axoplasma necesario, mientras que en una neurona madura intacta su función consiste en renovar el axón continuamente. Tanto en las neuronas maduras como en las neuronas en crecimiento, depende de la síntesis continuada de nuevas proteínas en el cuerpo celular. Se desconoce todavía el mecanismo del transporte lento, si bien se le supone similar a la "corriente protoplásmica" del movimiento ameboide. El axoplasma saldría propulsado del cuerpo celular hacia el axón, de forma parecida a como sale la pasta dental al exprimir el tubo.

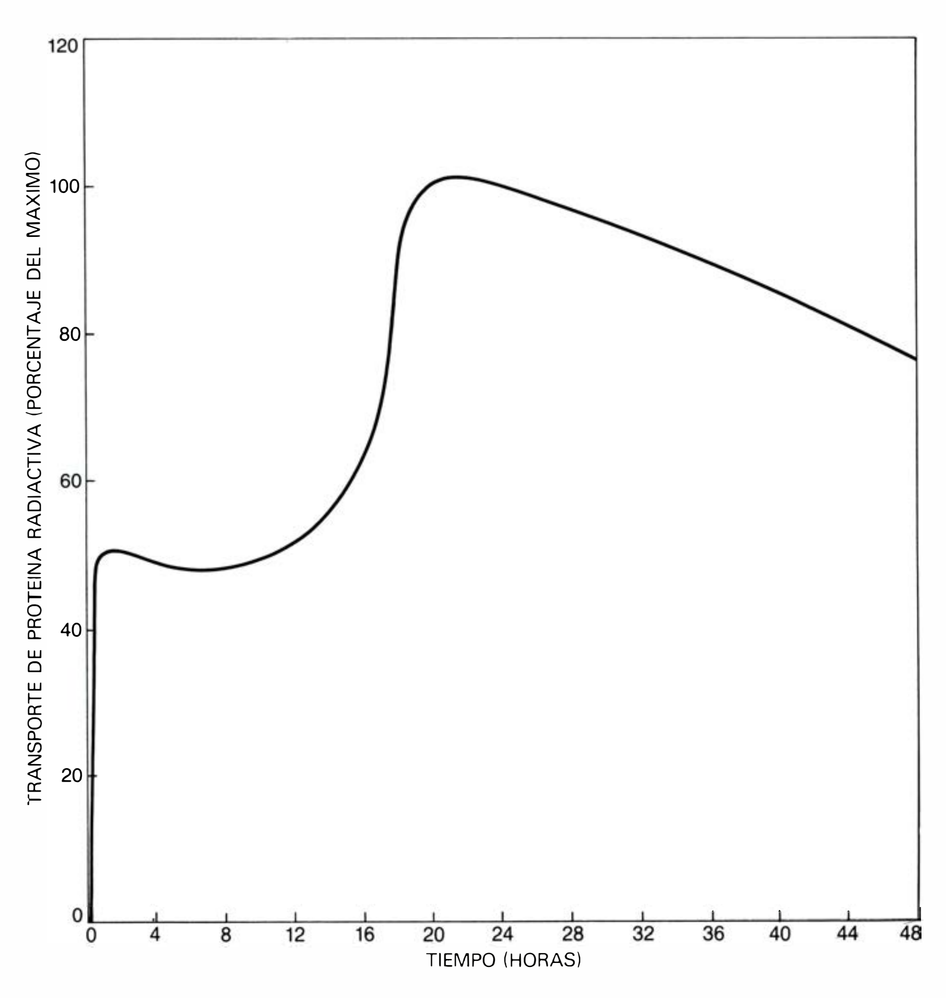
La analogía no es del todo exacta, puesto que la pasta dental es un líquido amorfo que se desplaza hidrodinámicamente. Existen buenas razones para pensar que los microtúbulos, neurofilamentos y microfilamentos se desplazan como un todo, como si se extendiera una estructura en forma de jaula, y no individualmente, cual subunidades libres. Son varias las moléculas propuestas como sustancias que entrecruzarían los filamentos para dar lugar a una estructura coherente; se han aislado bioquímicamente varias proteínas asociadas a los filamentos. Datos más directos sobre su estructura han sido obtenidos por Porter y Mark H. Ellisman, de la Universidad de California en San Diego, a partir de las micrografías realizadas con un microscopio electrónico de alta energía en la Universidad de Colorado en Boulder. La técnica que emplearon permitió estudiar secciones gruesas del axón. La imagen del axoplasma que emergió era una red tridimensional de polímeros fibrilares interconectados por estructuras a las que Porter y Ellisman denominaron microtrabéculas.

A mediados de la década de los 60, el trabajo llevado a cabo en distintos laboratorios había puesto de manifiesto la existencia de un componente rápido de transporte que se sumaba al movimiento lento del conjunto del axoplasma. Su descubrimiento no puede atribuirse a un solo investigador. En una reunión científica celebrada en la primavera de 1967, Samuel H. Barondes, de la Facultad de Medicina Albert Einstein de Nueva York, Annica Dahlström, del Instituto Karolinska de Estocolmo, Bernice Grafstein, de la Universidad Rockefeller, y Lasek y Sidney Ochs, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Indiana, presentaron pruebas experimentales del nuevo proceso.

Para caracterizar el nuevo tipo de transporte rápido se adoptaron dos planteamientos experimentales. El primero, que consistía esencialmente en



TRANSPORTE RAPIDO de proteínas en los axones determinado por la administración de aminoácidos marcados en la retina de la carpa dorada. La retina contiene los cuerpos celulares de las neuronas ópticas. Las secciones del tectum óptico, donde terminan las neuronas, fueron practicadas con diferentes intervalos y se cubrieron con una emulsión fotográfica. El mayor número de granos de plata aparece en las áreas de emulsión que recubren las zonas cerebrales con mayor concentración de material radiactivo. En esta autorradiografía, realizada por Bernard W. Agranoff, de la Universidad de Michigan, 24 horas después de la inyección del aminoácido en el ojo, la luminosidad que aparece en la zona derecha (el tectum) indica que la mayor parte de la proteína que incorporó el precursor marcado al ser sintetizada en el cuerpo celular de las neuronas de la retina se ha transportado hacia las terminaciones.



VELOCIDAD DE TRANSPORTE DE UNA PROTEINA MARCADA en el nervio óptico de la carpa dorada. La curva muestra los datos recogidos en cierto número de peces por Bernice Grafstein y colaboradores, de la Universidad de Rockefeller. La gráfica indica el porcentaje de la proteína marcada que ha llegado al tectum óptico en cada uno de los tiempos que aparecen representados en abscisas.

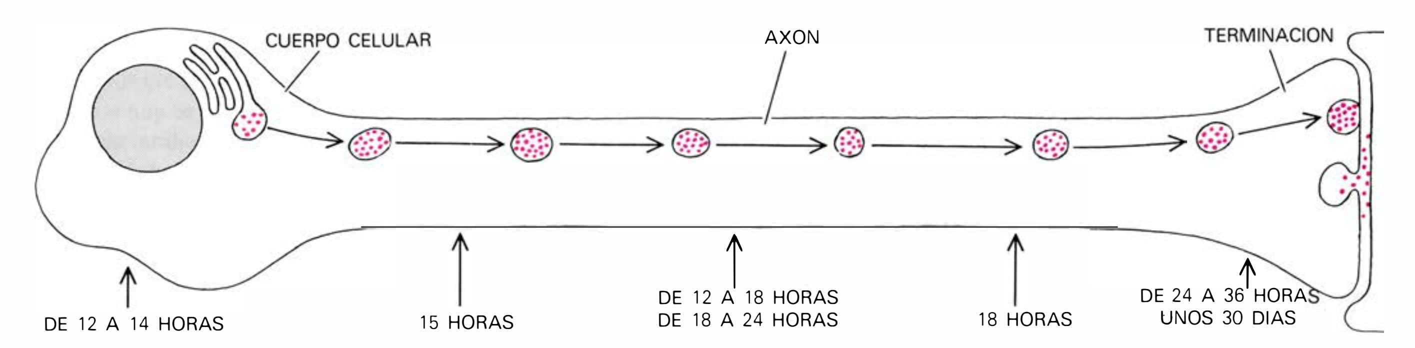


MOVIMIENTO DE UN NEUROTRANSMISOR puesto de manifiesto por su fluorescencia al ser iluminado con radiación ultravioleta en un microscopio de fluorescencia. Annica Dahlström, de la Universidad de Göteborg, autora de esta micrografía del nervio ciático de la rata, administró reserpina, sustancia que disminuye la cantidad de neurotransmisor en el sistema nervioso. Los neurotransmisores están normalmente almacenados en vesículas delimitadas por membranas que liberan su contenido en las terminaciones nerviosas cuando llegan los impulsos eléctricos, transmitiendo, de esta forma, la señal a otra neurona (célula nerviosa) o a otra célula muscular. La reaparición de la fluorescencia después de la administración de reserpina muestra la formación de nuevas vesículas de almacenamiento en el cuerpo celular y su desplazamiento a lo largo del axón por transporte rápido (*véase la ilustración superior de la página precedente*). Se destaca la presencia de nuevas vesículas por el área luminosa fluorescente localizada en la parte superior de un axón que ha sido bloqueado durante 24 horas.

una extensión de la técnica de constricción original de Weiss, pretendía medir la cantidad de constituyentes axoplásmicos individuales acumulados detrás de un bloqueo del nervio producido quirúrgicamente. Una importante serie de experimentos preliminares fue llevada a cabo por Liliana Lubińska, de la Academia Polaca de Ciencias. Ella y sus colegas interrumpieron una rama del nervio ciático de un perro en dos puntos, aislando en la pata un segmento de 70 milímetros. Después de la operación, y con distintos intervalos, se separaron los nervios para determinar la acumulación de una proteína asociada a la membrana, el enzima acetilcolinesterasa, en la región proximal al bloqueo más distante del cuerpo celular. Lubińska comparó la concentración del enzima detrás del bloqueo con la concentración presente normalmente en nervios intactos. Se detectó una acumulación a las dos horas de la operación; el enzima siguió acumulándose durante 20 horas, aunque a una velocidad menor.

Una primera aproximación sobre la velocidad de transporte de la acetilcolinesterasa se obtuvo dividiendo la velocidad inicial de acumulación (en unidades de enzima por día) por el contenido axónico normal (en unidades por milímetro). El resultado fue de unos 20 milímetros diarios; es decir, de 10 a 20 veces mayor que la velocidad determinada por Weiss para el conjunto del axoplasma. Lubińska consideró que la velocidad real podía ser mayor, pues el cálculo se basaba en los improbables supuestos de que todo el enzima que contenían los nervios era móvil y que el proceso del transporte no resultaba afectado por la lesión nerviosa. Experimentos posteriores demostraron que sólo un 10 por ciento de la acetilcolinesterasa del nervio podía desplazarse y que la velocidad real debía ser al menos 10 veces superior a la calculada inicialmente.

El segundo planteamiento experimental consistió en marcar radiactivamente las proteínas sintetizadas en el cuerpo celular. Para este tipo de estudio, neurona ideal es la que tiene el cuerpo celular a considerable distancia de sus terminaciones. Además de las células de los ganglios espinales ya descritas, Weiss y colaboradores, que trabajan ahora en la Universidad Rockefeller, propusieron otro interesante modelo experimental: las células ganglionares de la retina, cuyos axones recorren por el nervio óptico una gran distancia hasta alcanzar el tectum óptico en el cerebro. Grafstein, que inició su trabajo en el laboratorio de Weiss, continuó investigando en el sistema visual de la carpa dorada, inyectando un aminoácido marcado en un



CURSO DE RECUPERACION de una neurona cuyo sistema de transporte de vesículas de neurotransmisor ha sido bloqueado por la administración de reserpina al animal. La recuperación ocurre mediante la formación de nuevas vesículas (*color*); las vesículas se forman en el cuerpo celular y se desplazan a lo largo del axón con la cronología indicada. La recuperación de la función en la terminación nerviosa requiere aproximadamente un mes.

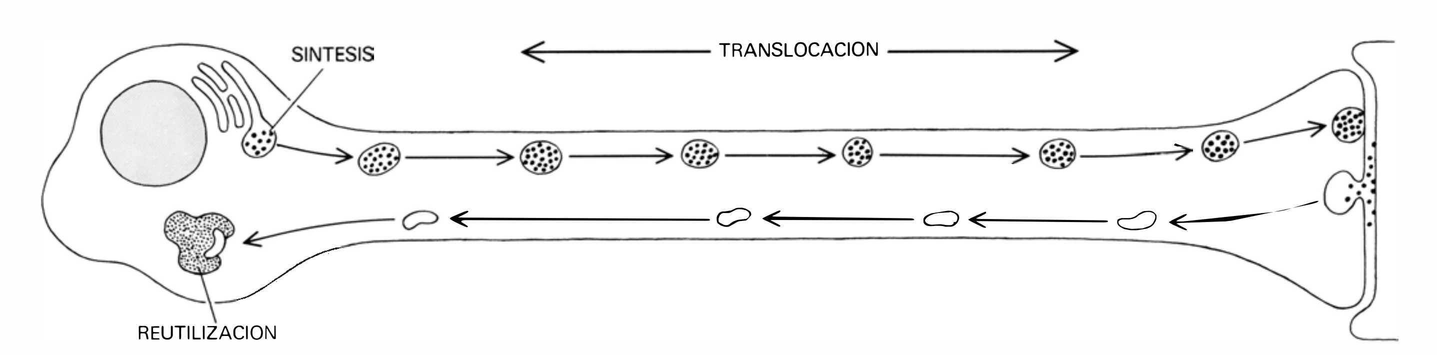
ojo. El otro ojo servía de control y los dos tecta se comparaban realizando autorradiografías cuantitativas con intervalos variables después de la inyección. En este método, se cubren secciones del tejido con una capa fina de emulsión fotográfica. Las sales de plata de la emulsión se activan por las radiaciones procedentes del tejido subyacente. Cuando se revela la emulsión aparecen granos visibles de plata metálica que indican la localización de la fuente emisora.

Grafstein detectó el marcaje del tectum inervado por células de la retina en el ojo experimental horas después de la inyección, si bien el grueso del axoplasma marcado no alcanzó el tectum hasta dos o tres semanas después. Quedaba claro, por tanto, que las proteínas marcadas durante su síntesis en la retina alcanzaban el cerebro en dos ondas separadas, una mucho más rápida que la otra. Como en el caso de los experimentos de Lubińska, resultaba difícil determinar con exactitud la velocidad del transporte a partir de estos experimentos. Por un lado, la autorradiografía cuantitativa es algo imprecisa y, además, las proteínas que se desplazan rápidamente siguen apareciendo en el tectum varios días después de ser detectadas por primera vez. Partiendo del pico de la primera onda y de la longitud media del nervio óptico, Grafstein estima la velocidad entre 10 y 50 milímetros por día cuando se mantienen los peces a temperatura ambiente. La velocidad es mucho mayor cuando se somete a los peces a una temperatura más alta, doblándose o triplicándose por cada incremento en 10 grados Celsius.

Determinaciones más precisas de la velocidad de transporte rápido se lograron estudiando la aparición de proteínas marcadas a lo largo del nervio ciático del gato. Ochs y Lasek, independientemente, inyectaron aminoácidos marcados en el ganglio de la raíz dorsal. Siguiendo un procedimiento experimental similar al descrito anteriormente para medir el transporte lento, pero sacrificando los animales horas después de la inyección, Ochs y Lasek cortaron el nervio ciático en piezas consecutivas y determinaron la distribución de la radiactividad a lo largo del nervio. Los análisis de la distribución temporal permitieron calcular una velocidad de 410 milímetros por día a la temperatura normal del cuerpo.

Los estudios ulteriores llevados a cabo en muchos animales de sangre caliente han puesto de manifiesto que dicha velocidad es notablemente constante. Es igual en neuronas sensitivas y motoras, en neuronas "mudas" en ausencia de estimulación o en las que son activas espontáneamente y en las estimuladas experimentalmente; no resulta afectada por la longitud o el diámetro del axón. Puesto que el transporte rápido es un proceso activo, depende del aporte adecuado de energía y oxígeno, pero no requiere que exista conexión permanente entre el axón y el cuerpo celular. Este hecho constituye una importante diferencia entre el flujo axoplásmico originado en el cuerpo celular y el transporte axónico. Una vez el material ha sido sintetizado y pasa al axón, se desplaza con autonomía en forma de transporte rápido (tal como mostraron desde un principio los experimentos de Lubińska y otros con segmentos de nervio interrumpidos).

Grafstein y colaboradores fueron los primeros en caracterizar las proteínas marcadas que se desplazan por transporte rápido en el sistema visual de la carpa dorada. A diferencia de los polímeros fibrilares, que se desplazan lentamente, y de las proteínas solubles transportadas por el flujo axoplásmico, las proteínas que se desplazan rápidamente son constituyentes de las membranas. Estudios posteriores de otros laboratorios con proteínas marcadas en los nervios olfatorio y ciático y otros axones

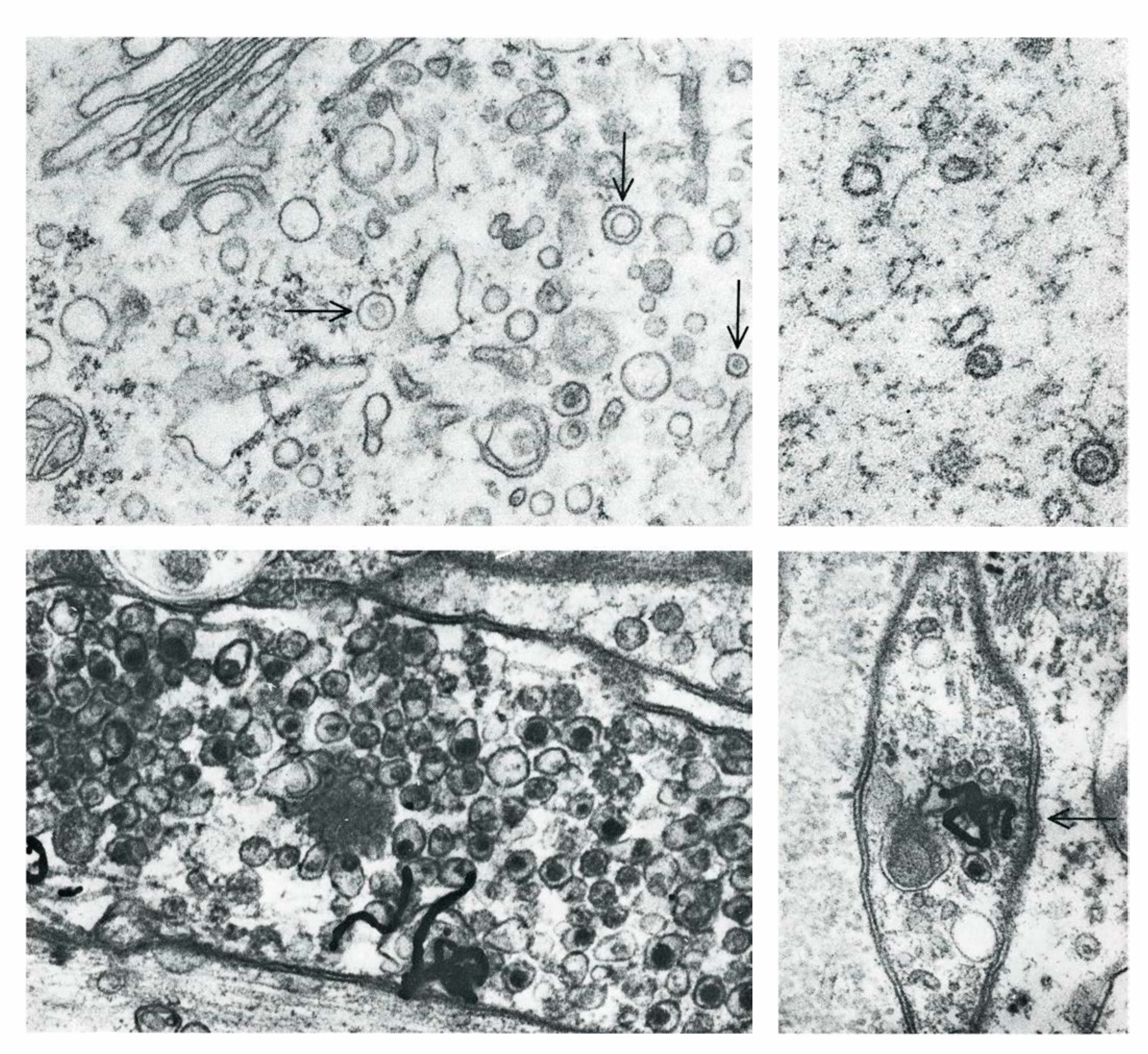


CICLO VITAL de las vesículas y otros orgánulos dotados de membranas implicados en la transmisión de señales nerviosas en la sinapsis (región especializada en la conexión entre una terminación nerviosa y otra neurona o célula muscular). El ciclo vital de las vesículas comienza con su síntesis en el cuerpo celular. Los orgánulos se desplazan a lo largo del axón mediante transporte axónico rápido. Parte del material se deposita a lo largo del axón y sirve para mantener el axolema (la membrana externa por la que se propagan los impulsos eléctricos), y parte, incluyendo las vesículas sinápticas, es transportado hacia la terminación nerviosa. El material vuelve al cuerpo celular en un movimiento retrógrado, y se restaura o destruye.

demuestran que el transporte rápido sirve para acarrear nuevo material de la membrana desde el cuerpo celular. La mayoría de este material es depositado a lo largo del axón, presumiblemente para mantener y reemplazar el axolema; el resto alcanza las terminaciones nerviosas. Los datos existentes sugieren que este material consiste en vesículas sinápticas y sus precursores.

Algunos de estos datos fueron obtenidos por Dahlström al estudiar la distribución de sustancias neurotransmisoras en las neuronas. Esta investigadora administró a ratas la droga reserpina, que disminuye en el sistema nervioso la producción de noradrenalina y otros neurotransmisores del grupo de las llamadas catecolaminas. La reserpina actúa bloqueando algún elemento del mecanismo de captación del neurotransmisor por las vesículas de la neurona, donde suele almacenarse. El estudio con el microscopio electrónico ha mostrado que las vesículas de almacenamiento están presentes en neuronas noradrenérgicas (neuronas con noradrenalina como neurotransmisor); las vesículas, escasas en el axón, están concentradas especialmente en las terminaciones nerviosas. Utilizando una nueva técnica muy sensible que revelaba la presencia de noradrenalina mediante el microscopio de fluorescencia, Dahlström demostró por primera vez que la reserpina reducía la cantidad de transmisor o vaciaba por completo todas las regiones de la neurona. Es decir, la reserpina inactivaba todas las vesículas.

Con la neurona libre de catecolaminas, Dahlström pudo observar cómo se formaban las nuevas vesículas en el cuerpo celular y cómo se desplazaban



DESARROLLO DE LAS VESICULAS a medida que son transportadas desde el cuerpo celular hasta las terminaciones nerviosas. Las micrografías electrónicas, realizadas en el laboratorio del autor por Ludmila J. Shkolnik, de la Universidad de Columbia, muestran varios puntos de una neurona gigante del molusco marino *Aplysia californica*. Las vesículas, marcadas por un isótopo radiactivo, contienen el neurotransmisor serotonina. La micrografía de la parte superior izquierda pone de relieve varias de ellas (*flechas*) en el cuerpo celular. En la micrografía siguiente se observa cómo se desplazan a lo largo del axón. Aunque las vesículas están bien formadas cuando abandonan el cuerpo celular, experimentan un desarrollo ulterior al alcanzar las terminaciones nerviosas, tal como indica su diferente morfología en la micrografía (*inferior izquierda*) que muestra la terminación de una neurona. La última micrografía expone una terminación sináptica con un área activa (*flecha*) donde las vesículas liberan el neurotransmisor, transmitiendo la señal nerviosa a otra célula. Las estructuras retorcidas teñidas de negro de las micografías inferiores son granos de Ag empleados de trazadores.

luego por transporte rápido a lo largo del axón. Cuando esta investigadora estudiaba la reaparición de fluorescencia debida a las vesículas llenas de noradrenalina, observó que la repleción de las vesículas comenzaba pocas horas después de la administración de una gran dosis de reserpina. La fluorescencia aparecía, en primer lugar, en una zona situada alrededor del núcleo, se extendía hasta llenar todo el cuerpo celular y, finalmente, reaparecía en el axón. En experimentos de constricción similares a los realizados por Lubińska con acetilcolinesterasa, Dahlström demostró también que, en las nuevas vesículas, la fluorescencia debida al transmisor aparecía rápidamente detrás de un bloqueo, lo que ponía de manifiesto que las vesículas se habían acumulado en virtud del transporte rápido. Los experimentos de Dahlström tuvieron una especial importancia, puesto que sugirieron que las vesículas implicadas en el almacenamiento del neurotransmisor eran importantes constituyentes celulares que se desplazaban por transporte axónico rápido.

El transporte axónico no sólo desplaza sustancias que proceden del cuerpo celular, sino que también lo hace en dirección opuesta, es decir, desde las terminaciones nerviosas hacia el cuerpo celular. Este transporte retrógrado constituye, por ejemplo, la ruta utilizada por los virus de la rabia y del herpes para alcanzar los cuerpos neuronales donde pueden multiplicarse. La toxina tetánica también alcanza el sistema nervioso central siguiendo esta vía; el período de latencia transcurrido desde el momento en que se produce la herida hasta que aparecen los síntomas del tétanos se debe en parte al tiempo requerido para el transporte axónico. El transporte retrógrado parece estar normalmente implicado en la devolución al cuerpo celular de membranas que han de ser degradadas o restauradas. La degradación de las membranas intracelulares corre a cargo de una familia de orgánulos denominados lisosomas; un componente importante del transporte retrógrado parece consistir en lisosomas que han captado material de la membrana.

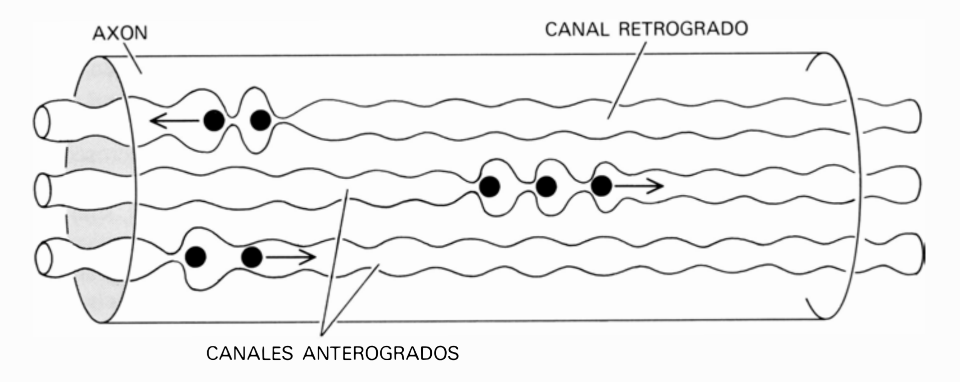
En el curso de la liberación sináptica del neurotransmisor, las vesículas que lo contienen se fusionan con la membrana presináptica de la terminación nerviosa; la vesícula se abre y vacía en el espacio sináptico su contenido, el neurotransmisor, que difunde a través de dicho espacio para ejercer su efecto en la membrana postsináptica. A fin de recuperar la membrana de las vesículas, se cree que la neurona lleva a cabo el proceso inverso al vaciamiento: la membrana se invagina y la concavidad formada se desprende hacia el interior, formando una nueva vesícula. Las membranas vesiculares se vacían y se llenan así muchas veces. Sin embargo, una pequeña fracción de la población de vesículas es captada al azar por los lisosomas y devuelta al cuerpo celular.

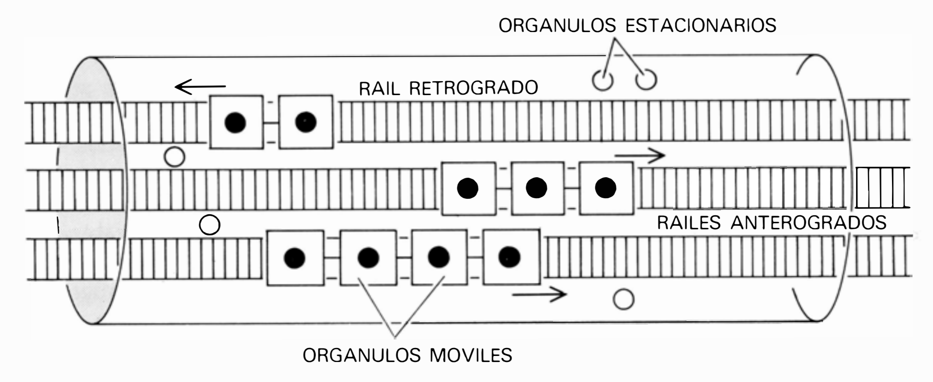
En el proceso de nueva formación de vesículas, la membrana invaginada engloba una pequeña cantidad de fluido del espacio sináptico y, mediante este proceso, una sustancia introducida en el medio extracelular del sistema nervioso puede ser captada por las terminaciones nerviosas. En el caso de que la sustancia se detecte fácilmente, puede seguirse su recorrido como un índice de captación y transporte retrógrado. La peroxidasa de rábano es un enzima especialmente útil para esta finalidad: captada fácilmente por las terminaciones sinápticas activas, se comporta, en virtud de su gran tamaño, como una pequeña partícula fácilmente detectable por técnicas histoquímicas que producen un precipitado opaco. La técnica de la peroxidasa de rábano fue utilizada inicialmente por Eric Holtzman, de la Universidad de Columbia, y fue desarrollada, ulteriormente, por Jennifer y Matthew LeVail, de la Universidad de California en San Diego. Hoy constituye un importante instrumento de investigación neuroanatómica, sobre todo como método para investigar el curso que siguen los axones desde sus terminaciones al distante cuerpo celular.

La técnica ha sido empleada ventajosamente para explorar vías cerebrales aún desconocidas, pero no es fácil obtener resultados cuantitativos que permitan determinar las propiedades cinéticas del transporte retrógrado. Las observaciones directas con el microscopio electrónico de orgánulos celulares en movimiento y de otras partículas que se desplazan en las células vivas a través de los axones han resultado más fructíferas para determinar la velocidad y el mecanismo del transporte rápido. Debido a las limitaciones del microscopio óptico, las observaciones pueden realizarse únicamente en tejidos extremadamente finos, como fibras nerviosas individuales, aisladas del animal, o células nerviosas mantenidas en cultivo celular. Además, únicamente pueden estudiarse partículas de tamaño suficiente para ser observadas con el microscopio óptico. Las vesículas de neurotransmisor, con un diámetro de 0,04 a 0,15 micrometros, son demasiado pequeñas; sin embargo, los lisosomas, cuyo diámetro se halla entre 0,2 y 0,6 micrometros, pueden contemplarse.

Si bien las observaciones microscópicas directas de los axones in vivo se iniciaron en la década de los 20, sólo los recientes avances en métodos ópticos y la introducción de la cinemicrografía y el análisis computarizado han hecho posible examinar el comportamiento de partículas individuales. David S. Forman y sus colegas, del Instituto Naval de Investigación Médica, han demostrado que partículas identificadas como probables lisosomas se desplazan predominantemente en dirección retrógrada en una serie de saltos discontinuos. Las partículas parecen moverse independientemente unas de otras. Cada uno de los saltos cubre distancias variables en un amplio rango de velocidades. La velocidad media del transporte retrógrado, de forma parecida a lo que ocurre con el transporte procedente del cuerpo celular, se muestra altamente dependiente de la temperatura. Forman ha recopilado los datos correspondientes a velocidades determinadas por diferentes investigadores, llegando a la conclusión de que la velocidad media del transporte hacia el cuerpo celular está comprendida entre la mitad y los dos tercios de la correspondiente al movimiento de las sustancias que salen del cuerpo celular.

Para dilucidar el desplazamiento por transporte rápido de orgánulos provistos de membranas, nuestra investigación se centró en un tipo de vesícula sináptica de una neurona gigante del molusco marino *Aplysia californica*. Partiendo de la base, tras décadas de investigación fisiológica, de que las neuronas de los invertebrados funcionan según principios comunes a las células nerviosas de todos los animales superiores [véase "Microsistemas de neuronas" por Eric R. Kandel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre, 1979], elegimos las células de *Aplysia* porque ofrecían importantes ventajas experimentales. La mayoría de los conocimientos actuales sobre transporte rápido se han obtenido a partir de experimentos realizados con el conjunto de un nervio; los nervios constan de miles de axones cuyas neuronas ostentan distintas propiedades que difieren incluso en el tipo de neurotransmisor y de vesículas. En *Aplysia*, el proceso de transporte puede estudiarse en una sola neurona cuyo neurotransmisor ha sido identificado. Además, los cuerpos neuronales de *Aplysia* poseen la característica de ser de 40 a 100 veces mayores que las neuronas de los vertebrados, y





MECANISMO DEL TRANSPORTE RAPIDO, según dos hipótesis distintas. En el primer modelo (*arriba*), propuesto originalmente por Weiss (y elaborado después por Bernard Droz, de Gif-sur-Ivette), los materiales se desplazan pasivamente entre las microtrabéculas del axoplasma o entre los túbulos del retículo axoplásmico. La propulsión tendría lugar a base de movimientos peristálticos (contracciones sucesivas de la pared del canal) o de movimientos ciliares. En el modelo propuesto por Sidney Ochs (*abajo*), de la Facultad de Medicina de la Universidad de Indiana, y defendido por Schwartz, un conjunto de fibrillas del axoplasma proporcionan una estructura a modo de raíl sobre la cual las sustancias son transportadas por filamentos. Un extremo del filamento está unido al orgánulo transportado y el otro al microtúbulo, dispuesto a lo largo del axón. El movimiento es unidireccional en cada raíl.

sus axones son también mayores en igual proporción. Su gran tamaño permite el análisis bioquímico directo de las neuronas individuales o de parte de las neuronas, y permite también inyectar directamente en una célula determinada grandes cantidades de precursores radiactivos, drogas y moléculas proteicas cuyo tamaño les impediría penetrar en las células si fueran administrados en la corriente sanguínea.

Las vesículas de neurotransmisor pueden detectarse y seguir su curso, marcando el componente proteico o lipídico de su membrana o el contenido de las vesículas, el propio neurotransmisor. En nuestro laboratorio hemos utilizado estos procedimientos, en primer lugar en el Centro Médico de la Universidad de Nueva York, y, más recientemente, en la Facultad de Medicina y Cirugía. En colaboración con Richard T. Ambron, James E. Goldman y Ariel A. Sherbany realizamos la microinyección de un aminoazúcar que resulta rápidamente incorporado a las glucoproteínas y glucolípidos de la membrana del cuerpo celular de una célula cerebral gigante de *Aplysia*, cuyo neurotransmisor es la serotonina. El cuerpo celular de esta neurona, cuyo diámetro ronda el cuarto de milímetro, se encuentra en el ganglio cerebral. El único axón de estas neuronas, después de recorrer alrededor de un milímetro, experimenta una bifurcación, dando lugar a dos ramas de igual tamaño, que abandonan el ganglio siguiendo dos nervios distintos, en los que discurren a lo largo de uno o dos centímetros antes de ramificarse en numerosas terminaciones que forman sinapsis.

Conociendo las características bioquímicas de las moléculas marcadas por el aminoazúcar, resulta factible seguir el destino del nuevo material de la membrana de diferentes formas. Por ejemplo, fraccionando el material celular con una centrífuga o por otros procedimientos que separan las distintas partículas celulares según su tamaño. La determinación de la radiactividad existente en cada fracción mostró que la mayoría de la nueva membrana sintetizada entraba a formar parte, en el cuerpo celular, de orgánulos del tamaño correspondiente a las vesículas de neurotransmisor. La tinción y otras técnicas histoquímicas, así como la autorradiografía al microscopio electrónico, revelaron la distribución de membrana recién sintetizada en varias regiones de la neurona y nos permitió examinar el ciclo vital de la vesícula.

El transporte axónico no es más que un episodio relativamente corto en la vida de una vesícula sináptica. La membrana de la vesícula se origina en el cuerpo celular, y las vesículas desempeñan su principal papel fisiológico en las terminaciones nerviosas; entre su génesis en el cuerpo celular y su llegada a la sinapsis, la membrana de las vesículas experimenta distintas transformaciones. Una de las ventajas de estudiar el transporte axónico en una neurona individual es la seguridad de que las distintas estructuras membranosas observadas en diferentes regiones de la célula pertenecen a la misma célula. En colaboración con Ludmila J. Shkolnik hemos examinado el aspecto variable de las vesículas de neurotransmisor en el cuerpo celular, en el axón y en las terminaciones de la neurona gigante de *Aplysia*. Hemos podido identificar poblaciones de estructuras membranosas características de cada región, que pueden relacionarse entre sí siguiendo la secuencia de su desarrollo.

El movimiento de las vesículas marcadas puede medirse por técnicas similares a las descritas anteriormente para el estudio del transporte en nervios complejos. Puesto que el material se encuentra en el axón de un nervio individual, las características cinéticas no representan un promedio de diferentes tipos de partículas desplazándose a lo largo de diferentes axones; más bien se trata de propiedades de un tipo específico de orgánulos, todos ellos pertenecientes a una célula individual. Trabajando en colaboración con Daniel J. Goldberg y Sherbany, analizamos el movimiento de vesículas en los axones de la neurona cerebral gigante, marcando su contenido, el neurotransmisor serotonina. Observamos que las vesículas marcadas por microinyección de serotonina radiactiva en el cuerpo neuronal se desplazaban a lo largo de los axones con una velocidad constante de 130 milímetros por día, a temperatura ambiente. Al igual que en otros animales, la velocidad era muy sensible a los cambios de temperatura. La translocación de vesículas no dependía de la presencia del cuerpo celular: las vesículas se desplazaban en segmentos aislados del axón, de igual modo que lo hacían en el sistema nervioso intacto. Nuestros resultados, hasta la fecha, indican que el transporte en el axón de los moluscos es idéntico al proceso descrito en otros animales.

Los experimentos llevados a cabo con neuronas individuales pueden propor-

cionar información sobre el posible mecanismo del transporte rápido. Pudimos descubrir dos características de la cinética del transporte de vesículas de serotonina, que no habían sido reconocidos en estudios anteriores realizados con poblaciones heterogéneas de axones de vertebrados. Ambas características pueden ser interpretadas si el movimiento de las vesículas individuales es discontinuo y tiene lugar a saltos, y si la vesícula salta únicamente cuando entra en contacto con algún generador de fuerza. En primer lugar, observamos que una población de vesículas que iniciaba conjuntamente el movimiento como un grupo compacto, resultaba dispersado a medida que viajaba por el axón; la dispersión señalaba que las partículas individuales no se desplazaban al mismo tiempo. En este sentido, el transporte rápido difiere del transporte lento, en que los constituyentes fibrilares del axoplasma, conectados en forma de retículo, se desplazan conjuntamente. Al parecer, la dispersión es una peculiaridad constante de los materiales transportados por el axón. Günter Gross, de la Universidad del estado de Florida, marcó proteínas de la membrana de la neurona mediante la inyección de aminoácidos marcados en el hocico del lucio. Observó que las proteínas se dispersaban a medida que se desplazaban a lo largo del alargado nervio olfatorio de este primitivo pez óseo.

La segunda característica a destacar de nuestros experimentos en el axón individual de *Aplysia* es que el movimiento de las vesículas parece resultar afectado por la concentración local de las mismas vesículas. Cuando el número de vesículas resulta reducido en el axón, las vesículas se desplazan a una velocidad inferior a la habitual. En contraste, cuando la concentración de las vesículas del axón es doble o triple de lo habitual, la velocidad se dobla. Este tipo de conducta cinética puede explicarse según diferentes modelos mecánicos; todos ellos tienen en común el hecho de que las vesículas pueden existir en dos estados (en movimiento o en reposo) y que pasan más tiempo en movimiento cuando hay más vesículas presentes. Dicho de otra forma, las distintas vesículas dan saltos mayores cuando la concentración de vesículas es alta que cuando están solas. Este hecho (que podría tratarse de una particularidad de las neuronas de *Aplysia,* puesto que aún no ha sido observado en axones de vertebrados) tiende a mantener constante la velocidad de desplazamiento de una población de vesículas que viaja a través del axón. Si, por azar, una vesícula se adelanta al resto, su velocidad disminuye; si, por el contrario, se acumulan vesículas perezosas, su velocidad tiende a aumentar.

Las neuronas gigantes resultan ideales para estudiar el mecanismo del transporte axónico, puesto que pueden investigarse diversos agentes que bloqueen el proceso específicamente. Los alcaloides colchicina y vinblastina despolimerizan los microtúbulos. Estas drogas bloquean el transporte rápido en las neuronas de *Aplysia* y en las pequeñas neuronas de otros animales, lo que sugiere que los microtúbulos desempeñan un papel importante en el mecanismo de transporte. Los más firmes candidatos para aportar la fuerza motora del transporte son la actina y quizás otras proteínas contráctiles (como la miosina, que se combina con la actina para dar lugar a la contracción muscular, aunque se halla presente en las células nerviosas en cantidades mucho menores que la actina). Datos concluyentes sobre la participación de las proteínas contráctiles en el transporte rápido son difíciles de obtener en neuronas pequeñas, puesto que los agentes que bloquean su acción (a diferencia de los alcaloides) son demasiado grandes para atravesar la membrana externa de la célula. La microinyección en neuronas gigantes permite ahora ensayar la acción de macromoléculas introduciéndolas directamente en la célula.

El enzima pancreático desoxirribonucleasa I se une a monómeros de actina aislados y despolimeriza los filamentos de actina. Estos filamentos son también despolimerizados por otra proteína, "el factor despolimerizante de la actina", purificada a partir del suero por Renée Norberg y Astrid Fagraeus, del Laboratorio Nacional de Bacteriología de Estocolmo. Trabajando en colaboración con Goldberg, Beverly Lubit y David Harris, administramos por microinyección ambas proteínas en las neuronas gigantes de *Aplysia* y demostramos que ambas inhibían profundamente el transporte axónico. Gerhard Isenberg y Georg Kreutzberg, del Instituto Max Planck de Psiquiatría de Munich, obtuvieron un resultado similar después de la microinyección de desoxirribonucleasa I en la neurona gigante de sanguijuela. Estos experimentos ponen de manifiesto que los microfilamentos, que son polímeros de actina, estarían implicados en el mecanismo de transporte axónico.

Hay dos modelos generales para explicar el transporte rápido, ambos utilizan los microtúbulos, la actina y la miosina [*véase la ilustración de la página 109*]. Según el primer modelo, postulado inicialmente por Weiss y elaborado después por Bernard Droz, del Centro Nacional de Investigación Científica de Gif-sur-Yvette, los materiales se desplazan pasivamente entre los elementos microtrabeculares del axoplasma. De acuerdo con esta hipótesis, la membrana, ya sea en forma de orgánulos o láminas destinadas a ser transformadas en orgánulos, es transportada activamente a lo largo de canales del axoplasma, impulsada por peristalsis (ondas de contracción) o por cilios. Tanto la peristalsis como la acción de los cilios podrían estar generadas por proteínas contráctiles; los microtúbulos y otras proteínas citoesqueléticas serían necesarios para sostener la configuración adecuada de los canales o para afirmar los cilios.

En el otro modelo, defendido por nosotros, un componente fibrilar continuo del axoplasma proporciona carriles de desplazamiento esencialmente estáticos (salvo el flujo axoplásmico lento) y pasivos, en los que los orgánulos se desplazan de forma gradual. Los carriles muestran polaridad: el movimiento en cada uno tiene lugar sólo en una dirección. La traslocación en cualquier dirección resultaría de reacciones locales repetidas que utilizan energía. Una analogía mecánica familiar la constituye el movimiento de los trenes eléctricos: el tren no se desplaza si no se establece el contacto con el carril. Un modelo similar fue propuesto por primera vez en 1968 por Francis O. Schmitt, del MIT. En 1972, Ochs propuso un modelo detallado para el transporte que implicaba microtúbulos y filamentos compuestos de proteínas contráctiles. Un filamento estaría unido, por un extremo, al orgánulo que va a ser desplazado y, por el otro, a un microtúbulo que cursa paralelo al axón. Al acortarse el filamento, al igual que en la contracción del complejo actomiosina del músculo, se desplazaría el orgánulo a lo largo de los microtúbulos; los desplazamientos repetidos o el desplazamiento continuo dependerían de la repetición del proceso.

Ha transcurrido una década sin que dispongamos de una prueba específica que confirme uno u otro de los citados modelos. Dado el renovado interés actual en la motilidad intracelular en general y la disponibilidad de neuronas gigantes en las que pueden inyectarse distintas sustancias por microinyección, es probable que pronto se logre determinar el mecanismo real del transporte axónico rápido.

Juegos matemáticos

Huevos de Pascua: cocidos, crudos, a la vinagreta y ¿por qué no? matemáticos

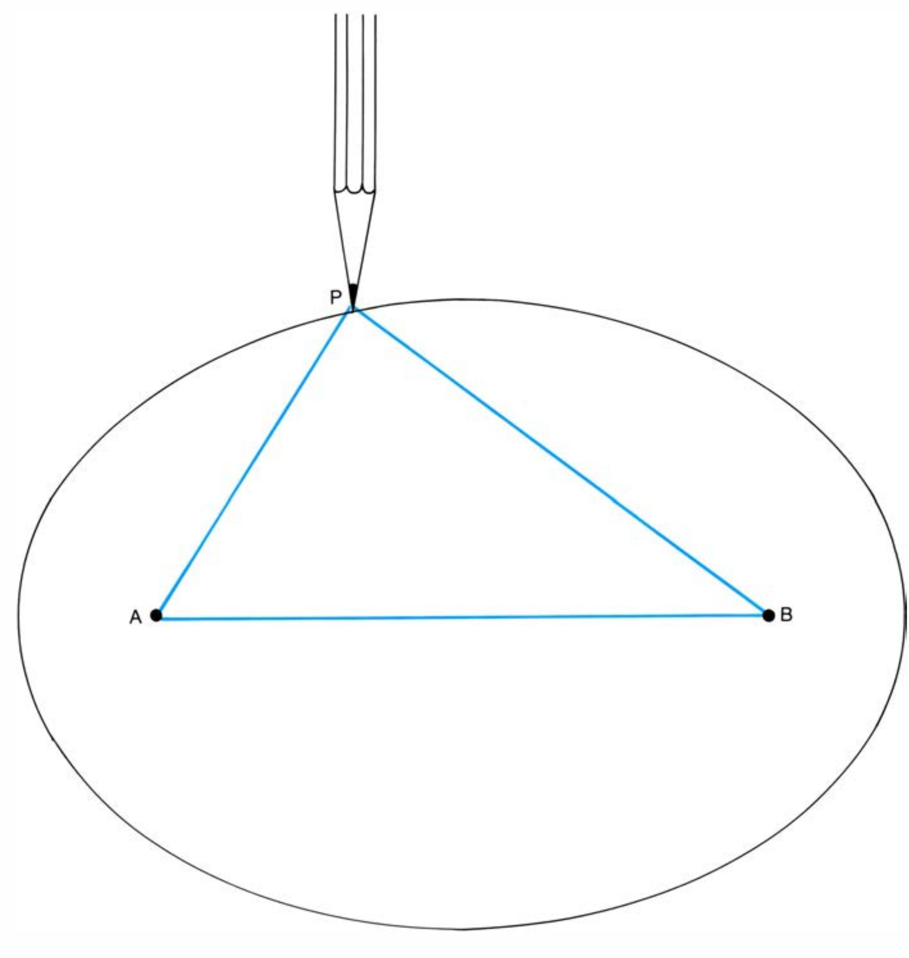
Martin Gardner

Esférico
(mas no del todo).
Hermético
(sin cierre, pero estanco).
Y blanco

MAY SWENSON

¿Qué escultura natural y sencilla puede haber más grata a la vista y al tacto que el blanco huevo de la gallina? Por uno de sus extremos, este objeto es más puntiagudo que por el otro; y su deliciosa forma ovalada varía ampliamente de un huevo a otro. La forma del huevo de gallina puede ser imitada matemáticamente, y hay sinnúmero de curvas algebraicas parecidas, de grados no muy altos. Entre las más sencillas están los óvalos de Descartes, familia de curvas cerradas descubiertas por este matemático y filósofo francés. De igual forma que la elipse se construye con dos alfileres y un hilo, algunos óvalos cartesianos pueden trazarse así.

La ilustración inferior hace ver que puede trazarse una elipse manteniendo tirante con la punta del lápiz un bucle triangular, al tiempo que con el lápiz describimos un arco. (Los hilos de nylón son los más adecuados, por su mínimo rozamiento.) Dado que la suma de los segmentos *AP* y *BP* no puede variar, este método garantiza que la línea trazada sea el lugar geométrico de los puntos cuya suma de distancias a los focos *A* y *B* permanece constante.



La elipse: **AP + BP** *es constante*

En la ilustración superior de la página siguiente vemos cómo engendrar un óvalo cartesiano por un método parecido. Ahora tenemos que formar con el hilo un bucle alrededor del alfiler situado en *B*, y atar el extremo a la punta del lápiz. Manteniendo el hilo tenso puede trazarse la mitad superior del óvalo. La mitad inferior se construye por el mismo procedimiento, invirtiendo el montaje del hilo.

Como es obvio, este método genera una curva que es lugar geométrico de todos los puntos cuya distancia a *A*, sumada con el doble de su distancia a *B*, es constante. Descartes generalizó este procedimiento, imponiendo que fuese constante la suma de m veces la distancia a *A* más n veces la distancia a *B*, siendo m y n números reales. La elipse y la circunferencia son casos particulares de óvalos cartesianos. En las elipses, m y n son ambos iguales a 1. La circunferencia es una elipse donde la distancia entre los focos es igual a cero.

En el óvalo de la figura, m es igual a 1 y n es 2. Haciendo variar la distancia focal, la longitud del hilo, o ambas cosas, podemos trazar una infinidad de óvalos cartesianos cuyos parámetros o multiplicadores estén en relación 1:2. Vemos en la ilustración inferior de la página siguiente cómo construir una familia de óvalos cartesianos cuyos multiplicadores conserven relación 2:3. En este nuevo caso, uno de los focos yace en el exterior del óvalo. Evidentemente, la técnica de trazado con hilo sólo será aplicable cuando m y n sean enteros positivos, y suficientemente pequeños, pues si no, los bucles del hilo lo inmovilizarían por fricción.

Muchos físicos eminentes, entre ellos Christiaan Huygens, James Clerk Maxwell e Isaac Newton, quedaron fascinados por las excepcionales propiedades ópticas de reflexión y refracción que exhiben los óvalos cartesianos. En 1846, la Royal Society of Edinburgh dio lectura a una memoria de Maxwell, "On the Description of Oval Curves and Those Having a Plurality of Foci". Sin saberlo, el físico escocés había redescubierto los óvalos de Descartes. No obstante, Maxwell fue todavía más lejos, pues al estudiar curvas con más de dos focos generalizó muchísimo el concepto de óvalo. Maxwell no pudo presentar por sí mismo el trabajo ante la Royal Society, porque tenía solamente 15 años, ¡y fue considerado demasiado joven para disertar ante tan distinguido auditorio! (Este trabajo del joven Maxwell puede verse en *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell,* publicados por Dover.)

Entre los muchos óvalos que por ser más redondeados por uno de sus extre-

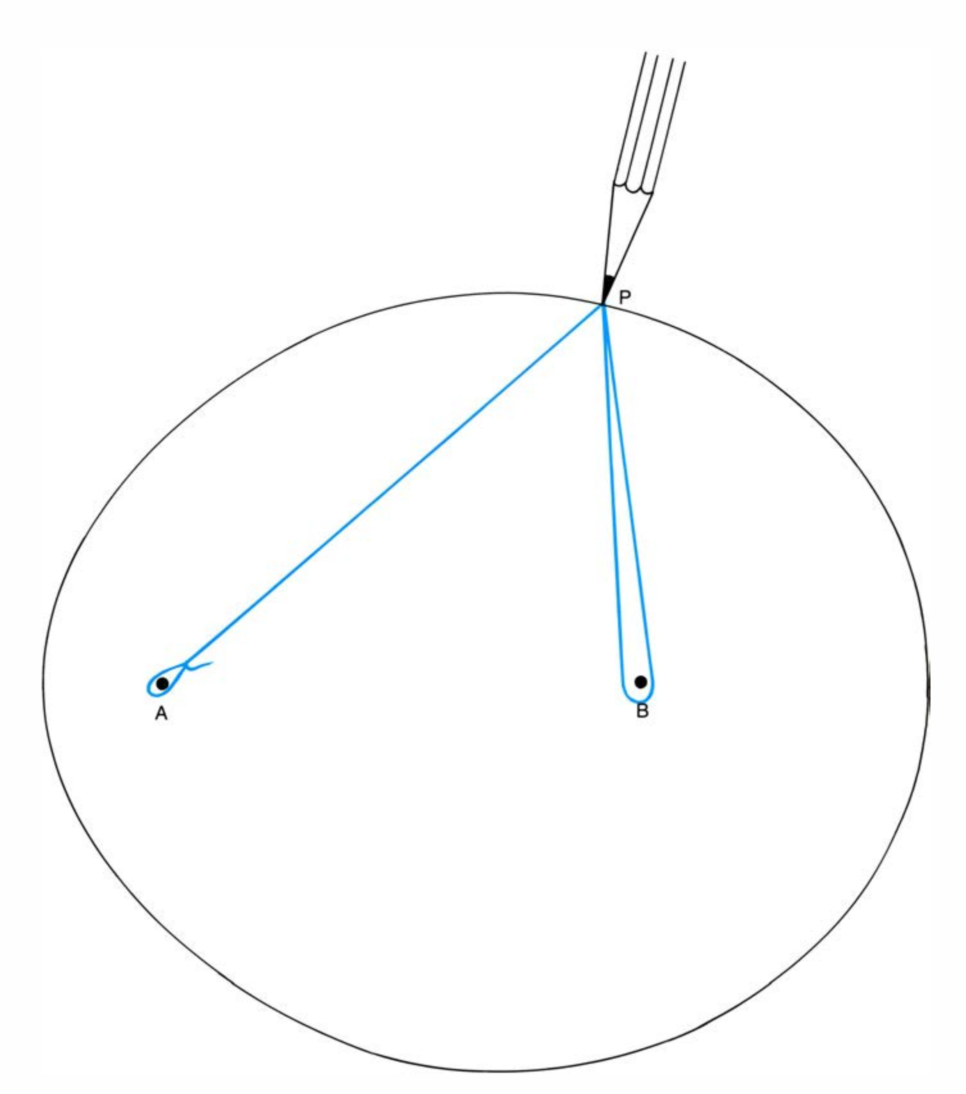
mos recuerdan huevos de ave, se encuentran los conocidos óvalos de Cassini. Los óvalos de Cassini son lugares geométricos de puntos cuyo producto de distancias a dos puntos fijos es constante. No todos los óvalos de Cassini tienen forma de huevo, pero cuando la tienen se presentan por pares que apuntan en direcciones opuestas.

Por sus propiedades físicas, los huevos de gallina permiten cierto número de trucos de ilusionismo. Los lectores que se decidan a realizar los "experihuevos" siguientes, a buen seguro los encontrarán entretenidos y dotados de un evidente interés científico.

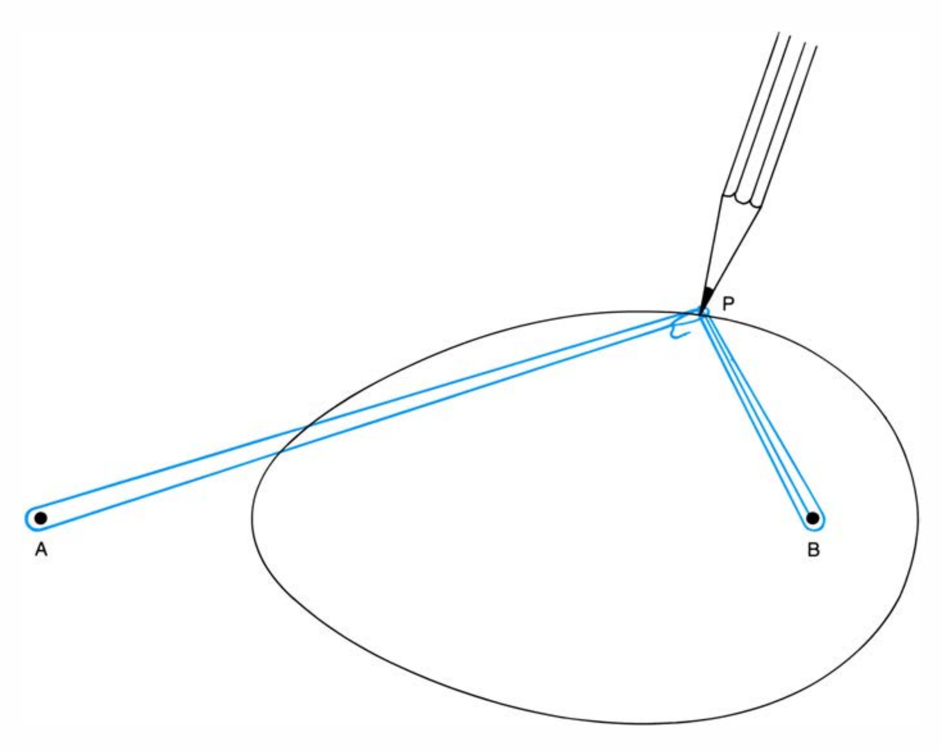
De todos los trucos con huevos, sin duda el más viejo está en conseguir que se sostengan sobre una punta. Se dice que Cristóbal Colón lo consiguió presionando firmemente una punta contra la mesa, hasta cascarla ligeramente. Otra solución más pulcra y diestra consiste en echar sobre una mesa o mantel blanco una pizca de sal, asentar y equilibrar el huevo sobre la sal y eliminar de un soplido toda la sal sobrante, a excepción de los pocos granos que mantienen el huevo en pie. (En el capítulo 18 de mi *Mathematical Carnival* se estudian con algún detalle unas formas macizas llamadas "superhuevos", ideadas por Piet Hein, que se sostienen en equilibrio sobre un extremo, sin artimañas ni trucos.)

La verdad es que en una superficie irregular, como la de un mantel o una acera, no es proeza excesivamente difícil dejar en equilibrio un huevo sobre su extremo más romo. Sólo hacen falta paciencia y pulso bien templado. De cuando en cuando, este ejercicio adquiere en algunos sitios proporciones de manía colectiva. Así, en el número del 9 de abril de 1945, la revista *Life* daba cuenta de cómo Chungking había sido víctima de la obsesión de poner huevos de pie. Y es que según una tradición popular china, durante el Li Chung, primer día de primavera en el calendario chino, resulta más fácil conseguirlo.

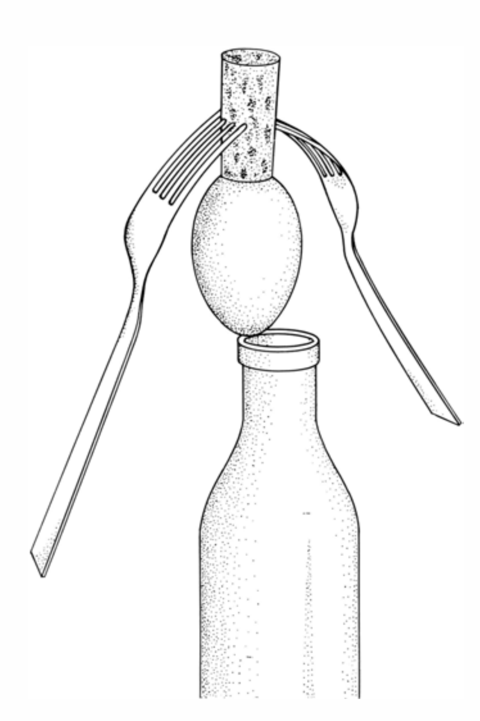
En la ilustración superior de la página siguiente podemos ver un antiguo y formidable truco para poner huevos de punta, que se sirve de un corcho, una botella y dos tenedores. Conviene que los tenedores sean lo más largos posible, y que sus mangos tengan mucho peso. El tapón de la botella debe estar bien plano; las de tapón corona, como las de bebidas carbónicas, son muy adecuadas. Es preciso vaciar cuidadosamente uno de los extremos del corcho, para que asiente bien sobre el huevo. Aún con estas precauciones, harán falta bastantes minutos antes de conseguir una estructura estable. Y como el huevo se caerá



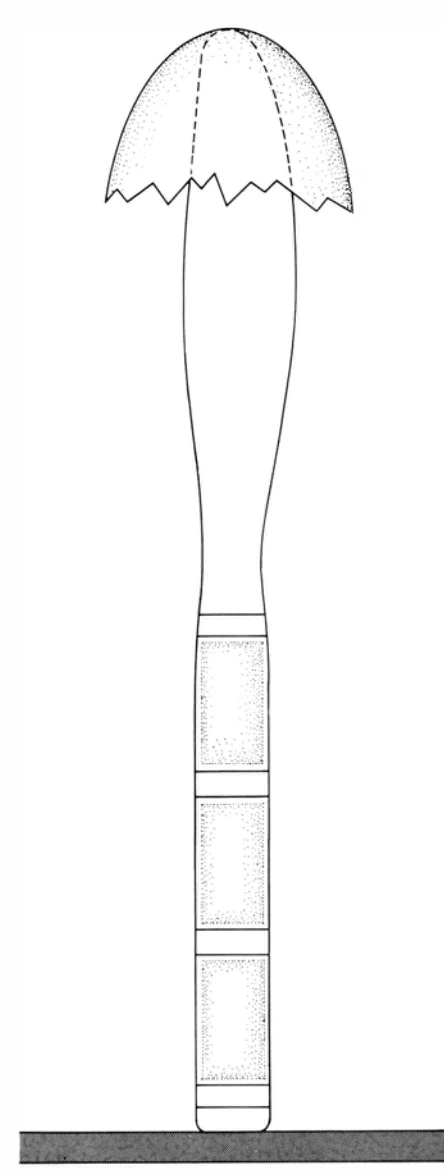
Un óvalo cartesiano: 1 (**AP**) + *2* (**BP**) *es constante*



Otro óvalo cartesiano: 2 (**AP**) + *3* (**BP**) *es constante*



Método para dejar un huevo en equilibrio sobre una botella



Método para romper una cáscara por inercia

varias veces antes de conseguir equilibrarlo, más vale usar huevos duros. Pero una vez conseguido el precario equilibrio, quien no conozca las leyes físicas sobre centros de gravedad lo encontrará asombroso y de todo punto incomprensible.

Y precisamente la habilidad para poner de pie un huevo puede ser la clave para ganar sistemáticamente en un viejo juego. En él hacen falta una buen cantidad de huevos sensiblemente idénticos. Dos jugadores van por turno colocándolos uno por uno sobre una mesa cuadrada o circular. Pierde la partida el primer jugador que no pueda colocar su huevo sin apartar otros ya puestos. El jugador que actúe en primer lugar puede siempre ganar la partida colocando su primer huevo de pie en el centro de la mesa; en lo sucesivo, le bastará ir copiando simétricamente respecto al centro las jugadas de su contrario.

A causa de la inercia de su viscoso contenido ya resulta difícil conseguir que un huevo crudo gire rápidamente sobre sí mismo cuando está apoyado en un costado; conseguir hacerlo girar sobre un extremo es virtualmente imposible. Tenemos así un método rápido para distinguir un huevo duro de otro crudo: solamente el duro podrá hacer de trompo sobre una punta. Menos conocido es el siguiente truco con huevos crudos: hacemos girar el huevo sobre el costado, con la máxima celeridad posible, y después lo paramos totalmente, frenándolo de pronto con la yema del dedo. En cuanto se haya detenido, retiremos el dedo. La inercia del interior, que seguía girando, forzará que el huevo vuelva a ponerse en movimiento otra vez.

A Charlie Miller, un ilusionista amigo del autor, le encanta ejecutar un sorprendente truco con huevos duros. Comienza explicando que un huevo puede girar sobre un costado (y mientras, lo hace girar lentamente) y, también, hacer un trompo sobre una punta (y así lo muestra al auditorio), pero que solamente el arte de magia es capaz de conseguir que efectúe ambos tipos de giros en el curso de una sola maniobra. En ese instante con un impulso vigoroso, lo hace girar sobre el costado. Casi todos los huevos, y de forma especial los que estuvieron de punta durante la cocción, empiezan girando un cierto tiempo, para después, repentinamente, hacer un trompo en posición vertical. (Puede verse una explicación en una reimpresión de Dover, *Spinning Tops and Gyroscopic Motion: A Popular Exposition of Dynamics of Rotation,* por John Perry, así como en la sección de *Taller y laboratorio* del mes de diciembre del año pasado, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA.)

Raramente se ejecuta hoy el más vistoso de todos los trucos con cáscaras de huevo, probablemente porque requiere practicarlo largo tiempo, y, tal vez, porque es más fácil aprender de alguien que sepa realizarlo prácticamente que ir siguiendo instrucciones escritas. Se necesita una fuente redonda o un plato grande, de borde liso. De la cáscara de un huevo roto hay que recortar un trozo del tamaño aproximado de una moneda de 50 pesetas. No importa que los bordes estén mellados; sí conviene, en cambio, que el trozo se tome del costado del huevo, y no de los extremos.

La fuente se moja en agua, se coloca el trozo de cáscara en el borde, y se inclina la fuente con el ángulo que se ve en la ilustración de la página 118. La cáscara deberá ahora empezar a girar. Si se le va dando la vuelta al plato con las manos, manteniéndolo con la misma inclinación, la cáscara irá girando sobre sí misma con sorprendente velocidad al mismo tiempo que va recorriendo precariamente el borde del plato. Para conseguir hacerlo bien es necesario ir probando distintos trozos de cáscara, hasta dar con uno que muestre el equilibrio y convexidad precisos. Pero una vez que se le coge el tranquillo, no hay dificultad en repetir tan sorprendente prodigio cuantas veces se quiera. Aunque el truco está descrito en muchos libros antiguos sobre malabarismo, parece como si pocos ilusionistas conocieran apenas su existencia.

El siguiente truco, que fácilmente puede traducirse en una apuesta, no tiene más que un secreto: la inercia. Hágase con un cuchillo de cocina, de punta bien aguzada, sujételo en posición vertical y suspenda de la punta media cáscara de huevo, como se muestra en la ilustración inferior de la izquierda. Déle el cuchillo a un voluntario, y apuéstele a que no es capaz de perforar la cáscara dando un golpe seco con el mango del cuchillo contra la mesa o el mármol de la cocina. Cada vez que su amigo lo intente, la cáscara rebotará, indemne. En cambio, usted podrá cortarla cuando quiera. El secreto está en sujetar el cuchillo flojamente, sin apretar el mango, y hacer como que se golpea con fuerza, cuando en realidad se está dejando caer el cuchillo por propio peso, para que al dar en la mesa rebote. Este imperceptible rebote es quien consigue hacer que la punta del cuchillo atraviese la cáscara.

Cuando está intacta, la cáscara que protege al huevo es de una fortaleza muy notable. Es bien sabido que sujetando con las manos un huevo cuyas

puntas se apoyen en el centro de las palmas, prácticamente nadie consigue romperlo al apretarlo, ni aún entrelazando los dedos.

Lo que la gente ya no conoce tanto es lo difícil que resulta romper un huevo lanzándolo a lo alto, si cae en hierba. El número de la revista *Time* del 18 de mayo de 1970 daba cuenta de una tanda de experimentos de este tipo, realizados en Richmond, Inglaterra, por el director de una escuela para la buena instrucción de sus alumnos. Primero, un bombero de la localidad dejó caer sobre hierba huevos crudos desde lo alto de una escala de casi 25 metros. De diez huevos sobrevivieron siete. Más tarde, un oficial de la Royal Air Force hizo los arreglos necesarios para que un helicóptero dejase caer huevos en el césped de la escuela desde una altura de 50 metros. De 18 huevos sobrevivieron todos menos tres. El *Daily Express* contrató una avioneta Piper Aztec para que bombardease en picado un campo de aviación, lanzándole cinco docenas de huevos a una velocidad de casi 250 kilómetros por hora. De ellos, tres docenas resultaron indemnes. Pero cuando se lanzaron al Támesis huevos desde el puente de Richmond, las tres cuartas partes de ellos se hicieron añicos. Según el profesor de ciencias de la escuela, eso demostraba "que el agua es más dura que la hierba, pero más blanda que el cemento".

La fragilidad de los huevos al chocar contra superficies duras es proverbial. He aquí una broma pesada basada en ella. Apuéstele unos duros a su víctima a que no es capaz de sostener durante 30 segundos un huevo crudo junto a la rendija de una puerta deslizando los dedos índice y pulgar desde el otro lado por encima de la bisagra superior. Tan pronto el muy inocente haya asido el huevo, quítele el sombrero, colóquelo en el suelo directamente debajo, váyase y olvide todo el asunto.

Entre los trucos con fundamento científico que pueden realizarse con huevos, quizás el mejor, por cierto muy conocido, sea el que aprovecha la presión del aire para forzar a un huevo duro pelado a entrar, y luego a salir, de una botella de leche, sin que el huevo sufra ningún daño. La boca de la botella ha de ser de diámetro solamente algo menor que el huevo; hay que tener cuidado para no usar ni un huevo muy grande ni una botella muy estrecha. Empujándolo, es imposible hacer entrar el huevo. Para ello es preciso calentar el aire de la botella, y lo más sencillo es dejar la botella en posición vertical durante algunos minutos dentro de una olla de agua hirviendo.

Entonces se tapa la boca de la botella con el huevo y se saca la botella del agua. Al enfriarse la botella, el aire de su interior se contrae, creando cierto grado de vacío que absorbe el huevo al interior. Para sacar el huevo se le da la vuelta a la botella, a fin de que el huevo encaje en el cuello de la botella. Ajuste bien los labios contra la embocadura, y sople con fuerza para llenar el interior de aire comprimido. Al dejar de soplar, el aire se expande, arrastrando el huevo a través del cuello de la botella, y haciéndolo caer en sus manos atentas.

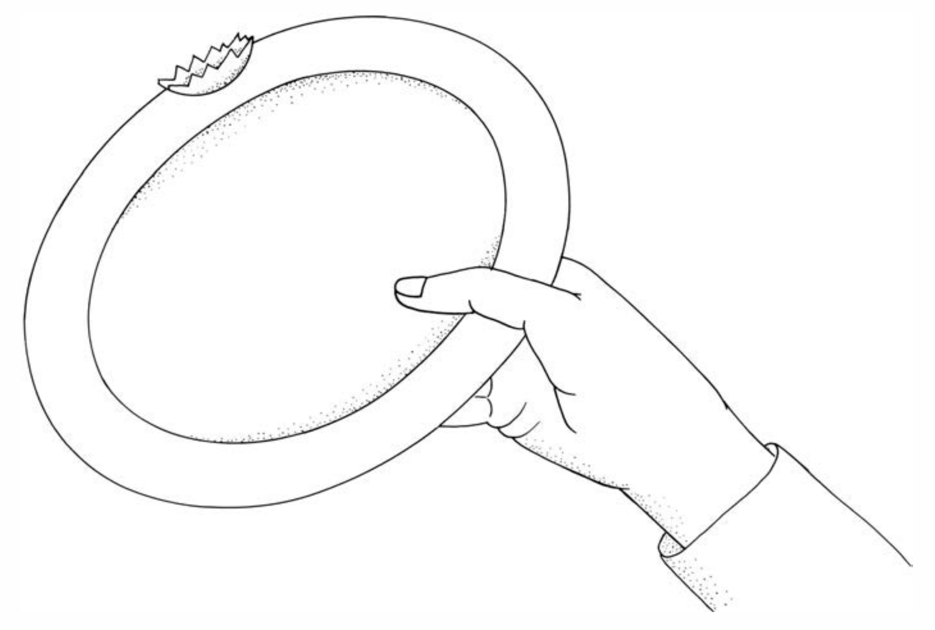
En muchos viejos libros se propone una variante más elaborada, con un huevo duro con cáscara. Se deja macerar el huevo durante varias horas en vinagre caliente, hasta que la cáscara se reblandezca y flexibilice. Se introduce el huevo en la botella por el procedimiento ya explicado, y después se deja durante toda la noche en agua fría con el fin de que la cáscara vuelva a endurecerse. Una vez vacía de agua la botella, tendremos una especie de milagro con que dejar atónitos a los amigos. Sucede, sin embargo, que el autor nunca ha conseguido tener éxito cuando lo ha intentado. La cáscara se ablanda, es cierto, pero al mismo tiempo parece hacerse porosa, con lo que no llega a crearse el vacío necesario. (Tendré el mayor placer en recibir noticias de lectores que hayan conseguido embotellar estos "huevos a la vinagreta".) Mas independientemente de que el truco funcione o no, el fracaso en conseguirlo es tema central de uno de los cuentos cortos más finos y divertidos que haya escrito Sherwood Anderson. Se titula "The Egg" ("El huevo"), y puede verse en su libro *The Triumph of the Egg*.

El cuento está narrado por un muchacho. Sus padres, que antes tenían una granja miserable de cría de gallinas, han comprado un restaurante frente a la estación de ferrocarril de Pickleville, no muy lejos de Bidwell, Ohio. El padre se tiene por hombre ameno y buen animador. En cierta noche de lluvia, el único cliente es un hombre joven, llamado Joe Kane, que espera un tren tardío. El padre piensa en distraerlo ejecutando para él su truco favorito.

"Echaré el huevo en esta cazuela llena de vinagre, y la pondré a calentar", le explica a Joe. "Y después, haré pasar el huevo por el cuello de una botella sin romper la cáscara. Cuando el huevo haya entrado del todo recuperará su forma normal, y la cáscara volverá a endurecerse. Entonces le regalaré la botella. Podrá llevarla consigo dondequiera que vaya. A la gente le picará la curiosidad, y querrá saber cómo se las apañó para meter el huevo. No se lo diga. ¡Déjelos que se rompan la cabeza! Así es como mejor se pasa con la botella."

El padre le guiña el ojo con sonrisa cómplice. Joe piensa que el viejo, aunque chiflado, resulta inofensivo. El vinagre reblandece la cáscara, pero al padre se le olvida un detalle esencial: calentar la botella.

"Durante mucho rato, mi padre estuvo luchando a brazo partido con la botella, tratando de hacer pasar el huevo por la embocadura... Trabajó y trabajó, tozudamente, y una especie de terca determinación se apoderó de él. Cuando creía que al fin iba a poder rematar su hazaña, el tren entró en la estación, y



Un trompo con una cáscara en el borde de un plato

Joe Kane echó a andar despreocupadamente hacia la puerta. Mi padre hizo un supremo esfuerzo para vencer al obstinado huevo, y obligarlo a realizar lo que él pensaba que le daría definitiva reputación de hombre ameno, capaz de entretener a sus clientes. Empezó a forzar las cosas, pensando que si no por las buenas, por las malas. Maldijo, y el sudor le perló la frente. Y entonces el huevo se le deshizo en las manos. Y en el momento en que la yema le salpicaba las ropas, Joe Kane, que se había parado en la puerta, se volvió y se echó a reír."

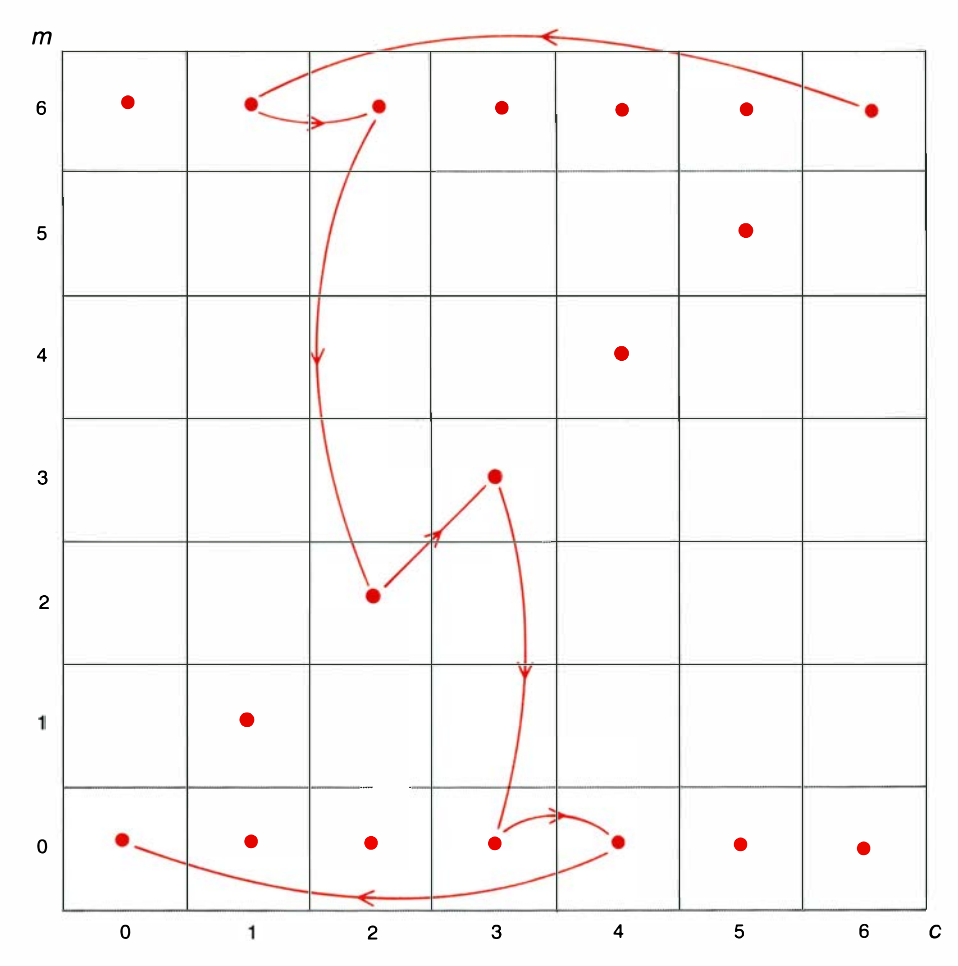
Rugiendo de rabia, el padre echa mano de otro huevo y se lo tira a Joe, fallándole por poco. Entonces cierra el resturante hasta el día siguiente, y renqueando pesadamente sube al piso, donde su mujer y su hijo se han despertado por el ruido. Lleva un huevo en la mano; y sus ojos brillan con fulgor demente. Posa suavemente el huevo en la mesilla de noche; rompe a llorar. El muchacho, emocionado al ver llorar a su padre, se echa a llorar también.

Los buenos cuentos tienen el poder de transformarse en alegorías. ¿Qué representa el huevo? Yo pienso que la naturaleza, el huevo órfico, el vasto universo, independiente de nuestro pensamiento, sin obligación de someterse a nuestros deseos. Comprendiendo las leyes matemáticas que le son propias, podemos controlarlo hasta extremos increíbles; así lo atestiguan la ciencia y la tecnología modernas. Pero si fracasamos en comprender sus leyes, si las olvidamos o despreciamos, la naturaleza puede ser tan malévola como Moby Dick, la ballena blanca, o el blanco huevo de la tragedia de Anderson.

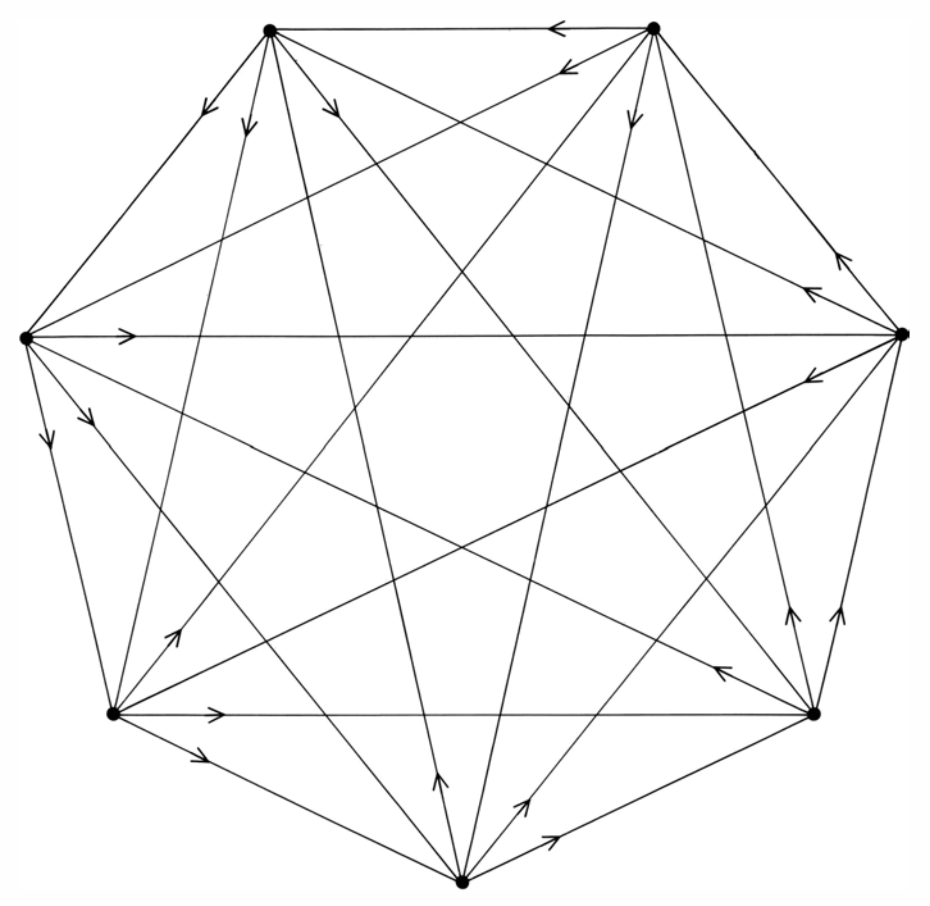
Un huevo es un huevo. Es un pequeño objeto físico provisto de una hermosa superficie geométrica. Es un microcosmos que obedece a todas las leyes del universo. Y al mismo tiempo, es algo infinitamente más complejo y misterioso que un canto rodado. Es una caja hermética, sin cierres ni costuras, que contiene el secreto mismo de la vida.

Neatly
The knife scalps it
I scoop out
the braincap
Soft
Sweetly shuddering.

(Traducción libre:
Rapa
limpiamente el cuchillo
la tapa.
Los sesos
dulcemente rebana
la cuchara.)



Solución en siete etapas al problema de misioneros y caníbales del mes pasado


Solución del problema de la tercera ciudad, debido a Paul Erdös

¿Qué es más importante, el huevo o la gallina? ¿No será, como dice Samuel Butler, la gallina el instrumento con que un huevo produce otro huevo? ¿O es quizás al revés?

"Me desperté al amanecer", concluye su relato el narrador de Anderson, "y durante mucho tiempo estuve contemplando el huevo que descansaba sobre la mesilla. Me pregunté por qué habrían de existir huevos, y por qué vino de un huevo la gallina que puso a su vez el huevo. La pregunta se me ha metido en la sangre, y allí continúa, a causa, me imagino, de que soy hijo de mi padre. En todo caso, el problema sigue enquistado en mi mente, sin solución. Y eso, concluyo, no es sino otra prueba del completo y definitivo triunfo del huevo –al menos por lo que a mi familia se refiere."

He aquí las soluciones a los problemas de grafos dirigidos del mes pasado: El único circuito hamiltoniano se obtiene partiendo de *A* y siguiendo un camino dirigido que deletrea la palabra AMBIDEXTROUS. Con un paso más podemos enlazar la *S* con la *A*, honrando de esta forma a *Scientific American*.

La ilustración superior de esta misma página es uno de los muchos dirígrafos que resuelven en siete pasos el problema de seis misioneros y seis caníbales que desean cruzar el río en un bote con capacidad para cinco personas.

El problema de Paul Erdös se resuelve colocando puntas de flecha en el grafo completo de siete vértices como se muestra en la ilustración inferior de la izquierda. Evidentemente, permutando como se quiera los puntos y las líneas que los conectan se obtienen soluciones que no tendrán esta forma simétrica, pero todas esas soluciones son topológicamente equivalentes. Véase "On a General Problem in Graph Theory", por Paul Erdös, en *The Mathematical Gazette* (vol. 47, n.º 361, págs. 220-223; octubre, 1963).

Benjamin L. Schwartz hizo notar que la demostración de imposibilidad dada el mes de marzo para el problema "¡Ajá!" sigue siendo válida aun cuando la gama de movimientos se amplía, permitiéndose saltar en diagonal, e incluso, movimientos de alfil de cualquier longitud. En el mes de noviembre pasado afirmé que la primera tanda de siete 3 en el desarrollo decimal de pi comienza en el dígito 710.150. Robert Baillie fue el primero en señalar el error, dando el dígito correcto, 710.100, más tarde confirmado por Harry Nelson y otros cuya lista obviamente sería estéril detallar.

Taller y laboratorio

Ilusiones ópticas creadas por una composición puntual y "nieve" de la pantalla del televisor

Jearl Walker

Propio de la percepción humana parece ser tratar de poner orden en el desorden. Vamos a comentar dos ilusiones fundadas en esa inclinación. Constituye la primera aquella disposición de puntos situados al azar que, vistos de una determinada manera, se diría que forman círculos concéntricos. La otra ilusión tiene que ver con las figuras y movimientos que aparecen en la pantalla del televisor sintonizado en un canal que no emite señales. La "nieve" que sale, sin orden ni concierto, en la pantalla puede ordenarse mediante un proceso visual.

Fue el año pasado cuando me interesé por vez primera sobre las representaciones puntiformes aleatorias. A. G. Klein, de la Universidad de Melbourne, me había escrito, y con la carta, venía una trasparencia de puntos distribüidos al azar; no tendrían unos el milímetro de diámetro, pero otros sí medían varios milímetros. Klein había fotografiado una hoja de papel sobre la que había desparramado polvo de grafito. Adjuntaba en su envío una copia de la transparencia.

Siguiendo las instrucciones de Klein alineé la transparencia sobre la fotocopia. Comencé a girar con suavidad la transparencia sobre un punto central. De repente, los puntos dispersos sin orden comenzaron a formar círculos concéntricos alrededor del punto de rotación. Aunque los círculos no eran perfectos, daban la impresión de que estaban trazados con ajustada exactitud. ¿Por qué el sistema visual del observador impone orden en el desorden?

Cualquiera puede fabricarse transparencias similares de puntos distribuidos al azar. Basta, por ejemplo, con introducir un viejo cepillo de dientes en un bote de pintura y luego rociar con él una superficie pasando un dedo por entre las cerdas. Podemos rociar la pintura sobre un papel y sacar luego una transparencia de la composición, o bien rociar directamente una hoja de plástico. Podemos intercalar también dos hojas de papel carbón entre una hoja de papel normal y otra de acetato. Las hojas de papel carbón se disponen reverso contra reverso. Se golpean luego las cuatro hojas repetidamente con las cerdas de un cepillo. Los puntos de impacto aparecerán como motas idénticas tanto en el papel normal como en el acetato. Algunos prefieren fotografiar un papel de lija, como D. M. MacKay, de la Universidad de Keele en Inglaterra, quien en 1964 señaló que podía contemplarse la ilusión de los círculos y espirales con los positivos y negativos de una fotografía del papel de lija. Cualquiera que sea la técnica, basta una ligera rotación de los dos modelos, una vez alineados, para producir la ilusión de los círculos concéntricos.

Leon Glass, de la Universidad de Rochester, pasó diez años investigando este efecto. En 1969 describió algunas de las observaciones sencillas que pueden hacerse con los modelos de puntos distribuidos al azar; y sacó sus propias conclusiones sobre los aspectos del sistema de percepción responsable de dicha ilusión. En 1973 Glass y Rafael Pérez publicaron los resultados de una variedad de experimentos sobre este tema. Ellos mismos fabricaron modelos con un generador de configuraciones pseudoaleatorias mediante un programa Fortran de computador. El computador elegía la posición de los puntos; éstos se dibujaban con un trazador automático; luego los gráficos volvían a repetirse a mano y se hacían las transparencias.

En algunos experimentos los modelos sobre papel y sobre transparencias eran del mismo tamaño, y así la alineación resultaba precisa. En otros, se reducía uno de los modelos y sólo cabía alinear entonces una pequeña zona. Cuando los dos modelos eran del mismo tamaño, el efecto observado por Glass y Pérez era el mismo que ya hemos descrito. Pero si los modelos discrepaban en su tamaño, podían contemplarse dos efectos distintos. Uno de ellos ocurría siempre que el experimentador alineaba los puntos en una pequeña zona y evitaba que la transparencia girase con respecto al papel. Los modelos así superpuestos daban la apariencia de una explosión. Bastaba una ligera rotación de la transparencia sobre el papel para transformar la explosión en una composición que recordaba las galaxias espirales.

Glass y Pérez se dieron cuenta de que si sólo se recogía una pequeña sección de los modelos superpuestos, la ilusión de los círculos, las explosiones o las espirales se hacía menos evidente, si es que no desaparecía por completo. Las ilusiones dependen de una correlación que establece el observador entre pares de puntos apropiados de los modelos (los que coincidirían si los modelos tuvieran la misma escala y mantuvieran una alineación cabal). Al girar los modelos, los pares se separan. El observador, evidentemente, contempla el cuadro completo, correlacionando los pares separados. De algún modo, la correlación provoca la ilusión. Ahora bien, si el campo visual se limita a una pequeña sección del modelo, el observador no consigue establecer una correlación idónea u ocurre quizá que el número de correlaciones no resulta suficiente para que la ilusión aparezca.

En otro montaje experimental, Glass y Pérez sacaron transparencias negativas de un modelo; obtuvieron así puntos blancos sobre un fondo negro. Las transparencias, aunque idénticas, una estaba girada con respecto a la otra. Colocaron las transparencias en un proyector estereoscópico para que el observador contemplara ambas a la vez. La intensidad de la luz de cada transparencia podía controlarse de forma independiente con dos pares de filtros polarizadores cruzados, un par ante cada transparencia. Si el observador quería rebajar la intensidad de la luz de la transparencia de la derecha, rotaba uno de los filtros de la pareja que estaba situada frente a dicha transparencia.

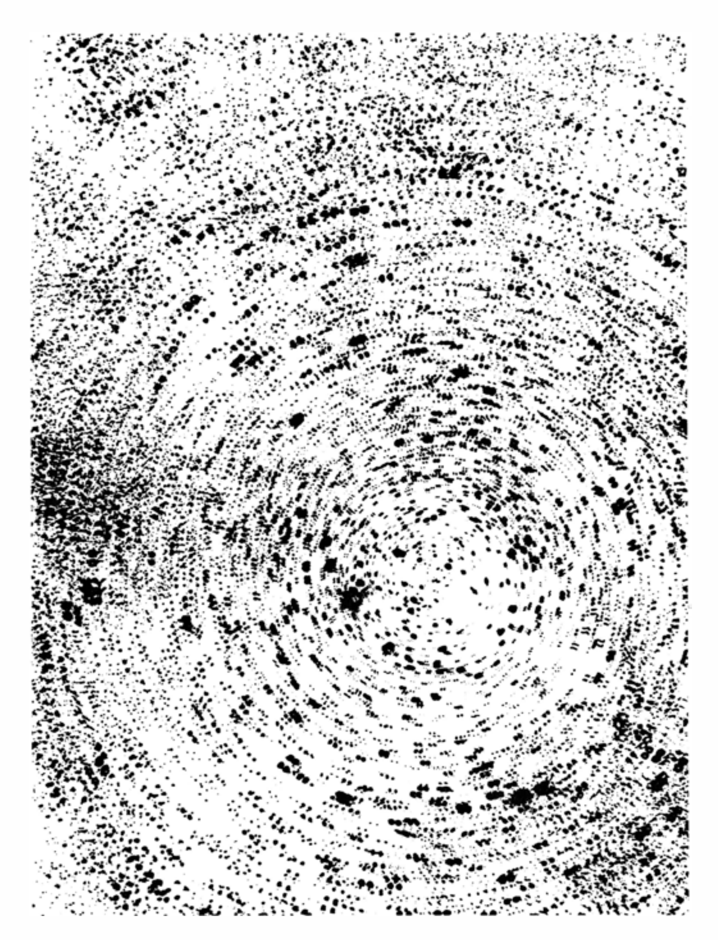
En uno de esos experimentos introdujeron una variante: pusieron transparencias idénticas girada una respecto a la otra. A medida que la intensidad de la luz de una transparencia decrecía, los círculos parecían girar. Supongamos, por ejemplo, que la transparencia P' estaba inicialmente girada en el sentido de las agujas del reloj respecto de la otra transparencia P. Al disminuir la intensidad de la luz de P' los círculos irreales rotaban en sentido contrario al de las agujas del reloj.

Cuando los experimentadores trabajaban con transparencias que normalmente producían la ilusión de una clara explosión, un cambio de intensidad en la luz de una transparencia determinaba que el tamaño de la figura pareciese variar. Si rebajaban la intensidad de la luz procedente de la transparencia que tenía la figura mayor de ambas, el modelo daba la impresión de hundirse.

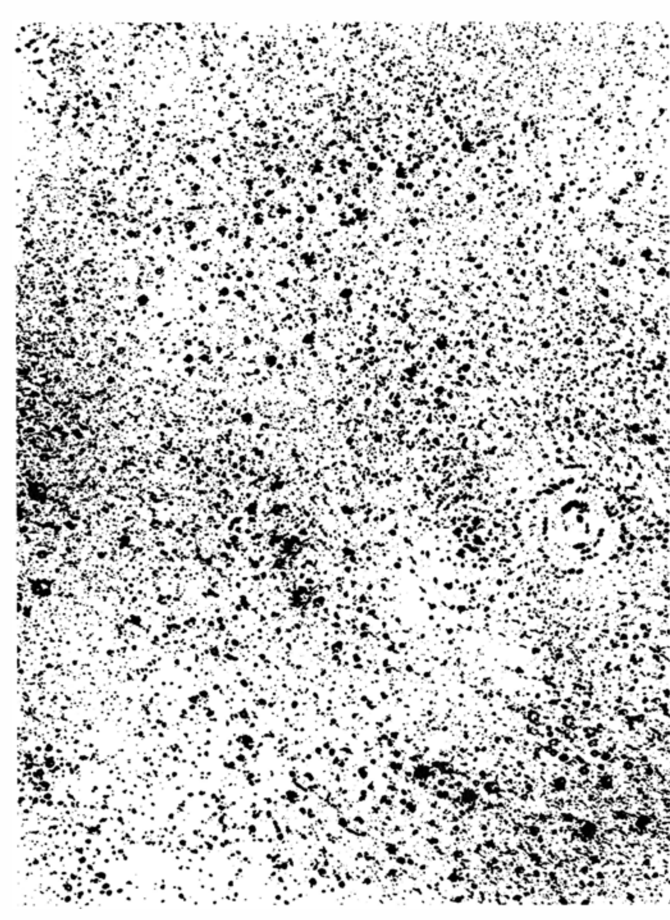
Glass y Pérez también experimenta-

Transparencia de puntos aleatorios de A. G. Klein

Leve rotación de la transparencia sobre una copia de la misma



Resultado de una rotación más enérgica



Desvanecimiento de la ilusión por rotación excesiva

ron con filtros de colores puestos en la trayectoria de la luz procedente de cada una de las transparencias. Conseguían así dar colores diferentes a cada conjunto de puntos. Persistía la ilusión de los círculos y de otras figuras. Más aún, si se modificaba la intensidad de la luz de un cuadro, volvía a hacer acto de presencia la ilusión de movimiento (rotación, contracción o expansión).

Cuando me entretuve con la transparencia y su copia que Klein me envió, alineé primero las dos con la máxima atención. Elegí un punto de la transparencia y situé en él, haciendo presión, la punta de un lápiz; me apresté a girar lentamente la transparencia hasta que comenzó a aparecer la ilusión del círculo para grandes radios contando a partir del centro de rotación. La ilusión requiere la separación de los puntos correlacionados, lo que empieza antes en los radios grandes que en la zona más próxima al punto de pivotación. Rotaciones más amplias alejaban los puntos más próximos del centro de rotación y hacían que la ilusión se desplazara hacia el centro. Con el tiempo, cuando la rotación alcanza una velocidad elevada, la ilusión se desvanece y sólo se ve un cuadro de puntos relativamente denso y ordenado.

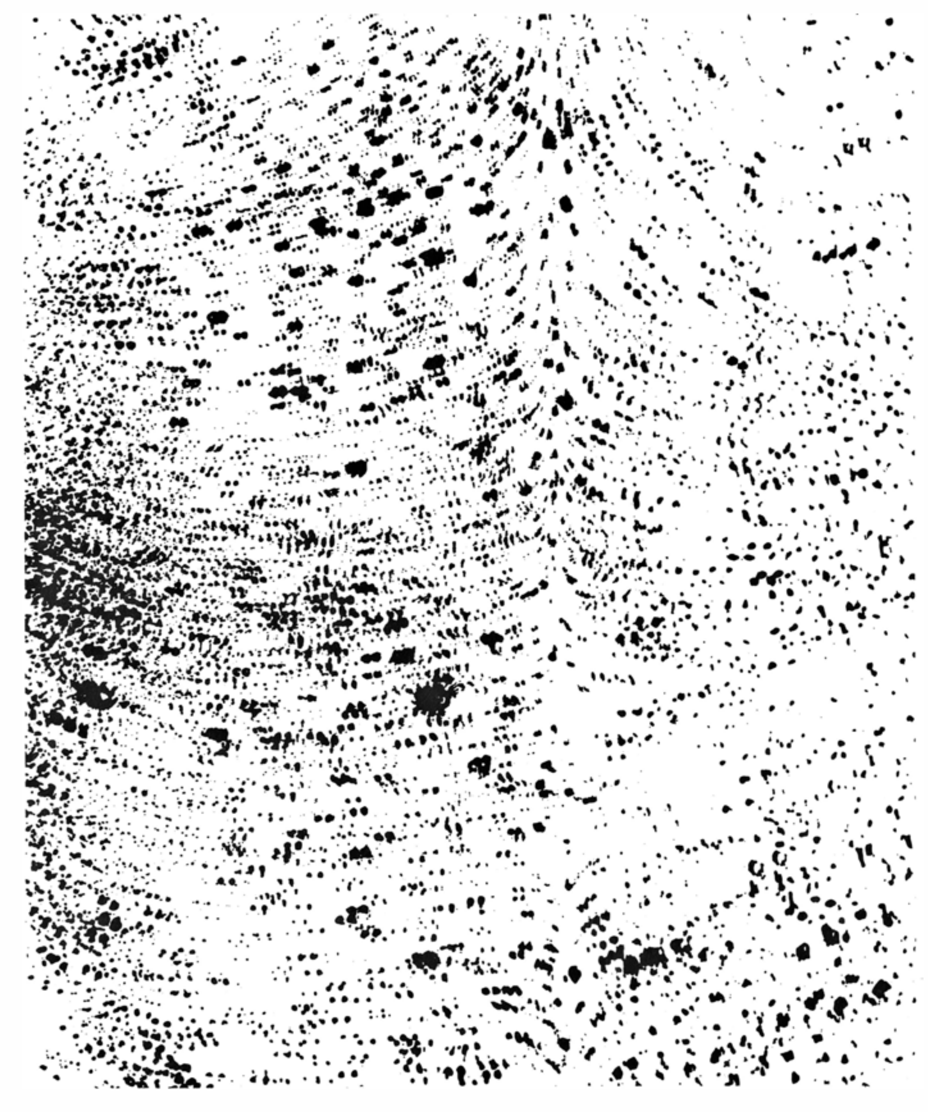
Los puntos más pequeños resultan de una eficacia mayor, a la hora de producir el efecto. Ello se debe quizás a que los puntos grandes necesitan de una rotación mayor para conseguir la adecuada separación, y, para entonces, muchos de los puntos pequeños no favorecen ya la ilusión. Un par de puntos dan su máxima contribución cuando están separados por una distancia igual a varias veces su diámetro. En las zonas relativamente densas de la figura, el efecto es débil a causa de que cuando dos puntos en relación se han alejado, otros puntos próximos interfieren la separación provocando la confusión.

Para modificar la dirección de propagación de los círculos en la ilusión, presionaba con mis dedos pulgares la parte inferior de la transparencia. Un golpe hacia arriba con el pulgar derecho generaba círculos con su centro hacia la izquierda; un golpe hacia arriba con el pulgar izquierdo generaba círculos con sus centros hacia la derecha. Con un ajuste intermedio logré que las líneas del efecto fueran rectas y no curvas. Al deslizar la transparencia sobre la copia con brusquedad, obtuve un efecto adicional: una onda blanca barría la página. La zona blanca aparecía en la región donde los puntos estaban alineados y así originaban la ilusión de líneas circulares. El resto de la página tenía líneas curvadas de varias clases. Conforme deslizaba la transparencia, el área de alineamiento se movía sobre la página y por tanto también lo hacía la región blanca.

Traté entonces de producir la ilusión de los círculos cambiando la transparencia de sitio y colocándola arriba y alineando varios puntos suyos con otros de la copia. La alineación no podía menos que resultar imperfecta, excepto para unos cuantos puntos que acertaban a tener aproximadamente el mismo tamaño y se hallaban en el sitio adecuado. Cuando, al girar, sacaba la transparencia de su correcta alineación, no había lugar para ilusiones. Como yo suponía, la ilusión requiere que sean bastantes los puntos de coincidencia. Era manifiesto que la mayoría de los puntos de la lámina debían hallarse en estrecha alineación con su correspondiente copia. Glass y Pérez andaban en lo cierto: la ilusión aparece de un examen "global" de la composición de puntos y no del examen de algunos pocos.

De la misma disposición pude deducir el tamaño mínimo del cuadro que debía observarse para seguir manteniendo la ilusión. Ajusté primero la transparencia con su copia al objeto de obtener la mejor ilusión de círculos. Cubrí la transparencia con una hoja de papel en la que había recortado un cuadrado. Según los distintos tamaños del agujero podían verse diferentes modelos. Si el área de visión sólo alcanzaba unas cuantas veces el tamaño medio de los puntos, la ilusión aparecía muy débil, si es que surgía. Pero si aumentaba dicha área hasta aproximadamente veinte veces el tamaño de los puntos, la ilusión era obvia. A mí me pareció observar una buena ilusión cuando el área visible multiplicaba por cincuenta el tamaño medio de los puntos.

Cuando levantaba ligeramente la transparencia de la fotocopia, la ilusión se transformaba, de círculos concéntricos, en explosiones o espirales. Glass y Pérez lograron ilusiones de este jaez superponiendo figuras que eran idénticas en todo menos en su escala. Llegué al mismo resultado porque, al acercarme la



Efecto resultante de una deformación de la transparencia

transparencia, el tamaño de ésta aumentaba ligeramente con respecto al de la hoja.

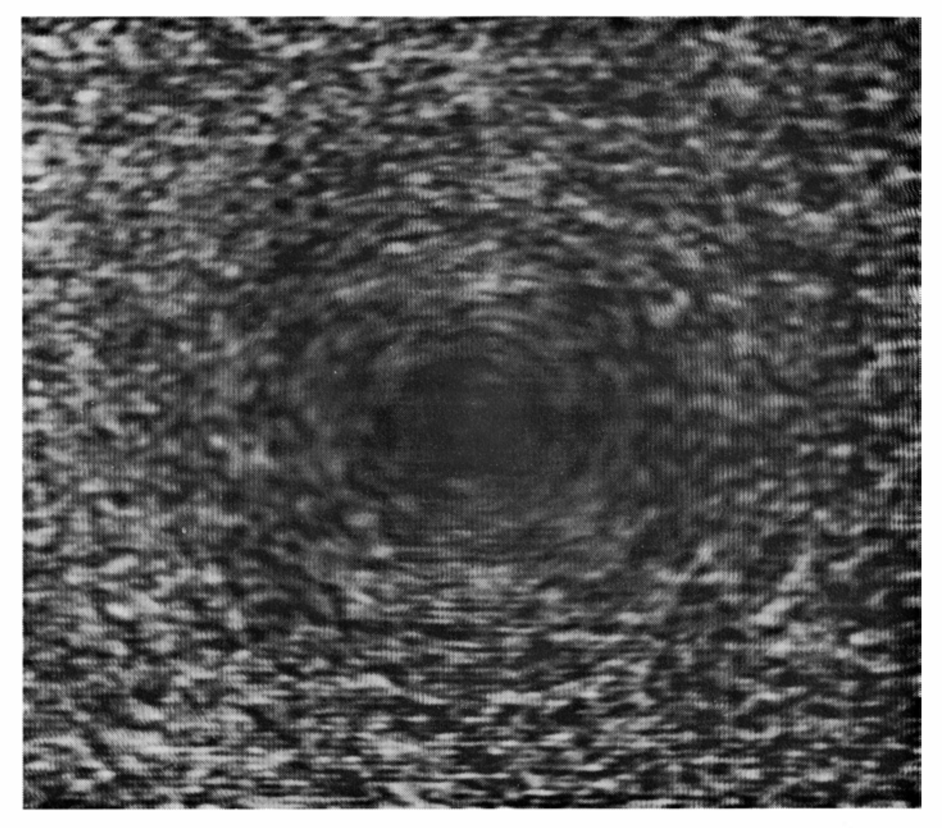
También se puede obtener la ilusión de una explosión manteniendo un espejo cerca de la transparencia y mirando luego, a la vez, la transparencia y su imagen especular con un mismo ojo. Si quiere recrear otra variedad de círculos, espirales y explosiones, alabee la transparencia cuando repose sobre la fotocopia. Si una vez alineada la transparencia con la fotocopia distorsionó la primera haciendo que forme una especie de colina hacia el centro de la página, en el extremo inferior se verán círculos, en el centro de ella espirales o explosiones y, en la parte superior, círculos mayores todavía.

Aparte de los experimentos con las rotaciones de las composiciones de puntos desparramados al azar, quizás el lector pretenda poner a prueba su habilidad artística en modelos geométricos de los que provocan efectos ópticos. Si se construye un modelo relativamente grande de puntos al azar y se distorsiona la transparencia de forma adecuada, puede conseguirse una ilusión óptica que vaya cambiando de acuerdo con la perspectiva. Los círculos y espirales variarán conforme uno se mueva delante del cuadro. Es probable que alguien haya hecho sus pinitos sobre esto en el "op-art", pero no sabría decir quién.

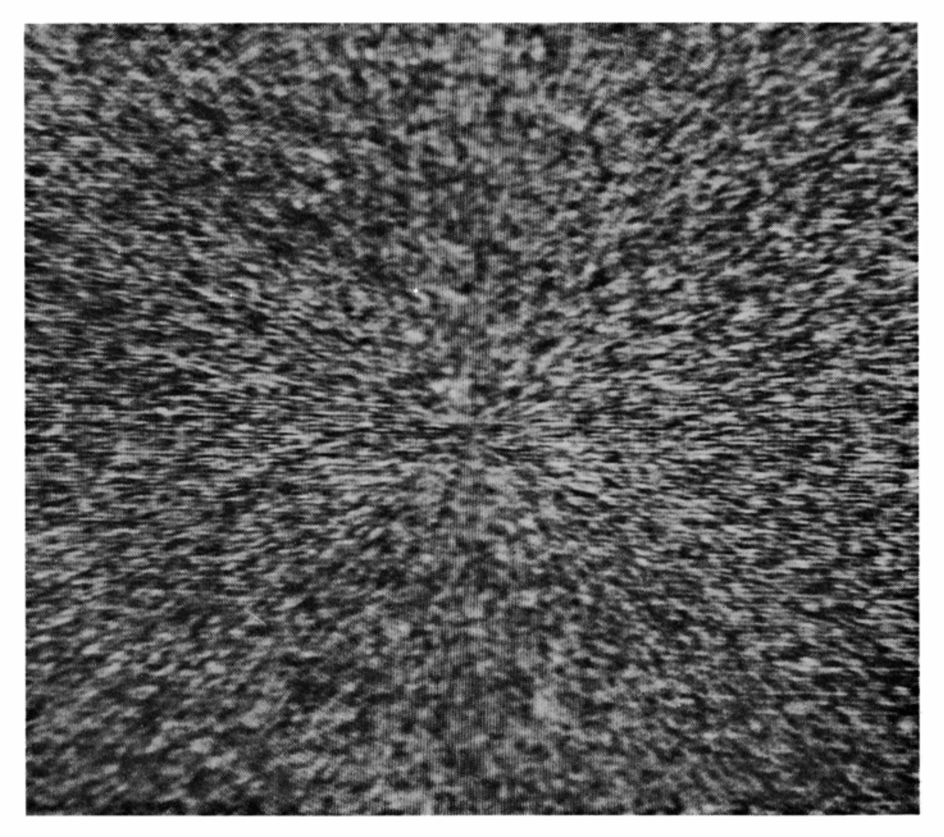
Aparece una composición de puntos aleatorios, distintos de las anteriores, al encender el televisor y sintonizar con un canal que no esté emitiendo señal. La pantalla se llena de "nieve" aleatoria captada por la antena. No se trata de un cuadro de puntos al azar, sino de una fluctuación aleatoria de intensidad de luz. Aunque es la intensidad de toda la pantalla la que fluctúa, las modificaciones en cualquier área pequeña de ella tienen un contraste mucho mayor que las fluctuaciones de toda la pantalla. Se da así la impresión de un conjunto de puntos blancos que se precipitan sobre la pantalla.

En 1961 MacKay describió varias ilusiones curiosas que podían verse en la nieve de la televisión. Si se mira con fijeza la pantalla, hallaremos que en el centro de su campo visual la nevada es más intensa que fuera del mismo. El efecto crece si se mira con un solo ojo. MacKay observó que esta región de agitación intensificada estaba relacionada con el área foveal del campo de la visión. La fóvea es la región de la retina que tiene la visión más aguda por albergar una mayor densidad de fotorreceptores.

MacKay señaló también que, contrariamente a lo que uno podría pensar, una pantalla de televisión vista con un solo ojo aparece más brillante y con mayor densidad de nieve que si se contempla con ambos ojos. Por otro lado, mirando con los dos ojos, las manchas sobre la pantalla parecen ser más persistentes y su movimiento ofrecer una característica más viscosa. Si se reduce la intensidad de la pantalla, su apariencia se uniformiza, se mire con uno o con ambos ojos. A bajas intensidades, la pantalla parece recibir sólo pequeñas motas de luz y gran parte del movimiento frenético desaparece.



Círculos sobre la nieve de la pantalla al superponer un modelo moiré n.º 4



"Agujero de emisión" en la nieve de la pantalla creada por el modelo n.º 5

Si mantenemos, frente a la pantalla, un dedo, un aro de alambre, un círculo negro o cualquier otro objeto similar, las motas parecen adherirse al mismo, creando la ilusión de una capa frontera en su entorno. Hasta podemos crear la ilusión de una corriente fluida si acertamos a elegir un objeto de configuración idónea. Si un arco negro se mueve cerca de la pantalla, las manchas parecerán moverse con él, como si estuvieran enlazadas al mismo. Un dedo en movimiento daría la impresión de ser perseguido por un enjambre de partículas.

En 1957, MacKay había demostrado que una rejilla situada sobre la pantalla del televisor podía ayudar al observador a organizar el remolino visual y convertirlo en una figura hasta cierto punto coherente. Situó una figura de líneas radiales sobre la pantalla; las manchas blancas de la pantalla parecían moverse perpendicularmente a las líneas, por lo que semejaban remolinos cuyo centro coincidía con el de la rejilla. El remolino podía producirse en el sentido de las agujas del reloj o en sentido antihorario. A veces, las áreas de la imagen parecían girar en sentido opuesto. Si MacKay giraba la rejilla, la imagen de la nieve semejaba girar en sentido contrario. Cuando colocó una rejilla de círculos concéntricos sobre la pantalla, los puntos de nuevo daban la impresión de moverse en unas corrientes perpendiculares a las líneas, pero esta vez fluían radialmente hacia fuera a partir del centro de la figura de la rejilla. La figura de la nieve también giraba lentamente alrededor del centro de la rejilla. En sus últimos experimentos, MacKay llegó a la observación de que, colocando un redondel sobre la pantalla, daba la sensación de que la nieve se amontonaba lentamente en el centro del mismo.

Repetí experimentos similares sobre la pantalla de mi propio televisor con un juego de transparencias moiré. En el paquete de transparencias los mejores efectos se conseguían con los modelos número 4 y número 5 al situarlos frente al televisor. El número 4 consistía en un pequeño círculo central rodeado por líneas radiales; el número 5 consistía en varios círculos concéntricos muy próximos entre sí.

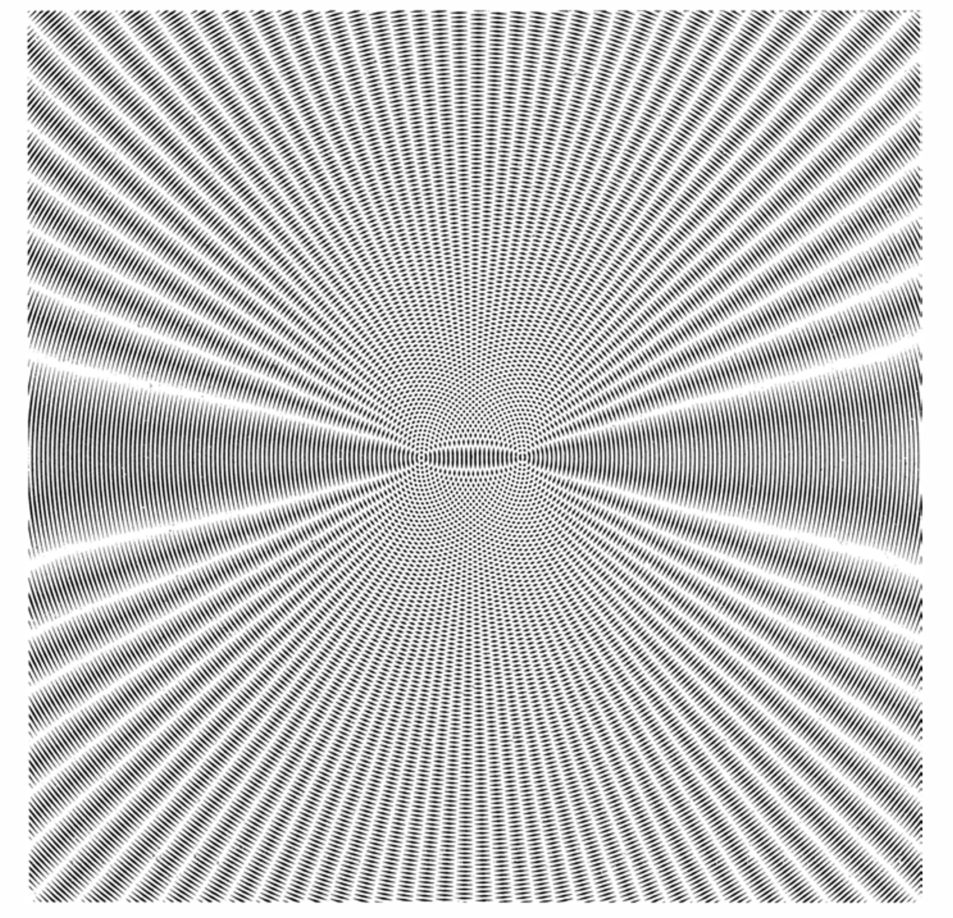
Cuando mantuve el número 4 sobre la pantalla, el centro del modelo aumentaba la frenética actividad de la nieve que giraba en espiral, en el sentido de las agujas del reloj o en sentido antihorario. Podía cambiar el sentido de giro aparente a voluntad. Para reforzar el efecto ajustaba los mandos de brillo y del contraste del aparato. Conseguía mejores resultados si quitaba el brillo totalmente y el mando del contraste lo ponía en la mitad. (Debo llamar la atención de que sólo la experimentación es la que puede determinar cuáles son las mejores condiciones de trabajo.) Los puntos blancos parecen salir de una superficie ligeramente curvada situada justo detrás del plano del cristal de la pantalla. Se presentaron las diferentes características del efecto, se mirase el aparato con uno o con ambos ojos.

Mantuve la transparencia ante un ojo, cerrando el otro; la ilusión cobraba entonces especial viveza, sobre todo si conseguía invertir el flujo o establecer simultáneamente un contraflujo. El flujo cerca del borde de la pantalla manifestaba menos actividad. Si bajaba la intensidad hasta que la pantalla se tornara prácticamente negra, el conjunto de puntos decrecía hasta semejar pequeños insectos que revoloteaban precipitadamente en torno a la rejilla.

El modelo número 5 organizó la nieve en pulsaciones, como si el centro del modelo fuera la fuente o el sumidero de las líneas radiales. Este efecto de "agujero emisor" se intensificaba notablemente cuando mantenía la transparencia cerca del ojo. La organización desaparecía de nuevo al bajar la intensidad de luz de la pantalla. Cuando elevaba la intensidad al máximo, recibía la impresión de que avanzaba un flujo de olas por la pantalla; se diría que las olas las produjera una piedra en su caída sobre una superficie de agua.

Desplazando ligeramente una transparencia del número 4 con respecto a una copia de la misma fija, se crean dos áreas de remolinos. Con dos copias del número 5 pude conseguir dos agujeros de emisión. Si alineaba las transparencias y luego desplazaba una, podía superponer los modelos moiré normales (que se distinguen cuando superponemos dos imágenes idénticas y luego desajustamos levemente una de ellas) sobre la organización de puntos en la pantalla. De mis transparencias, una tenía líneas negras y la otra, líneas rojas. El resultado de superponer las dos transparencias era que las líneas rojas se incorporaban a la corriente de nieve.

Nadie sabe con certeza qué proceso visual organiza la nieve cuando anteponemos al televisor determinados objetos. MacKay ha sugerido que la interacción de elementos sensibles al contorno del proceso visual podrían responsabilizarse quizá de la organización. Pero se desconoce el mecanismo. Tal vez los elemen-



Ilusión producida por ligera separación de dos modelos n.º 5 superpuestos

tos que en la cadena visual captan el sentido del contorno en las figuras superpuestas puedan ser insensibles al movimiento a lo largo de dichos contornos. Y así, el observador sólo vería el movimiento perpendicular al mismo. Por otro lado, parejas de elementos sensibles al contorno pueden realizar la sensibilidad del sistema visual al mencionado movimiento perpendicular. No se sabe cuál es la explicación correcta, pero en recientes trabajos hechos por MacKay, H. J. M. Gerrits y H. P. Stassen han demostrado que, si los modelos superpuestos se estabilizan en la retina, las figuras se debilitan y la ilusión de la organización de la nieve se diluye. (La estabilización de cualquier figura en la retina provoca la debilitación de su percepción.) Por esta razón es necesario percibir la figura para que se dé la ilusión o efecto óptico.

En 1974 R. I. MacDonald, de la Universidad de Carleton en Ottawa, describió una observación sobre la organización de la nieve del televisor en la línea de las explicaciones dadas por MacKay. MacDonald refería que cuando miraba a la nieve, primero con los dos ojos y luego con uno solo, aquella parecía moverse lentamente y las manchas hacerse más pequeñas. Consiguió el mismo efecto con una especie de nieve generada por un haz láser transmitido a través de un par de láminas de vidrio esmerilado. Conforme una de las láminas se movía alrededor de la luz procedente de la otra lámina, la luz se proyectaba sobre una pantalla.

MacDonald comprobó también si el efecto dependía de la correlación entre los dos ojos cuando ambos entraban en acción. Supongamos un observador que contemple la pantalla a través de dos tubos de cartón, orientados de manera que cada ojo vea una sección diferente de la pantalla. Cierra luego uno de los ojos. El efecto vuelve a presentarse, lo que implica que no depende de la correlación entre ambos ojos cuando se observa binocularmente la pantalla. El lector puede comprobar el resultado mirando la nieve de la pantalla de su televisor por medio de tubos de cartón.

A modo de último experimento, traté de desenfocar mis ojos mientras miraba la nieve de mi televisor. Al presionar suavemente la parte inferior de mi ojo, la nieve de la pantalla se hizo significativamente más vigorosoa y parecía fluir hacia arriba y hacia abajo. Me imagino que la presión alteró la forma de mi ojo y por lo tanto impidió un enfoque adecuado de la imagen de la pantalla sobre la retina. ¿Por qué este desenfoque incrementa la intensidad? No lo sé.

Libros

El gen egoísta, la medicina psicosomática y un extenso manual sobre electroquímica

Luis Alonso, Juan Rof Carballo y Pedro Molera

EL GEN EGOISTA, por Richard Dawkins. Editorial Labor, Barcelona 1979. En un estilo desenfadado, alguien diría que impertinente, el autor aborda todo lo humano y lo divino. No se ciñe, en efecto, a la descripción de los comportamientos sociales elementales (agresión, altruismo y sexualidad), sino que se adentra en el mundo de la evolución cultural y hasta de las creencias religiosas. Talante que comparten la mayoría de los biosociólogos más atentos a crear teorías que a contrastarlas. Richard Dawkins es un joven etólogo de treinta y nueve años que enseña comportamiento animal en la Universidad de Oxford, y ha conseguido con esta obra, traducida ya a varios idiomas, despertar la vis polémica de los evolucionistas, un tanto dormida desde Darwin.

Si en biología andan muchos cabos sueltos por atar, en sociobiología la provisionalidad de las afirmaciones que no gozan de suficiente respaldo experimental y observacional campa por sus respetos, por lo que muchos le niegan el status de ciencia. Quizá tenga algo que ver en ello el afán generalizador de sus máximos exponentes (Wilson, Maynard Smith), que no se arredran en salir de su nicho biológico para especular sobre temas menos tangibles: historia, ética, religión, etcétera. Como el renombre científico de Dawkins no alcanza el de los autores citados, le llueven los palos de todas partes. Así, a pesar de insistir en el carácter ciego del comportamiento de los genes, de sus explicaciones se desprende un evidente antropocentrismo, desde el caldo primitivo hasta los humanos, propiamente dichos; y ello se hace palpable al no prestar atención a los vegetales, una máquina de supervivencia carente de neuronas. Al insistir en las células nerviosas, se contradice cuando afirma que no se ocupará del aspecto citológico sino del génico por lo que al comportamiento y la evolución se refiere.

Los filósofos le achacarán que no aporta ninguna novedad, en el último capítulo, al asignar el progreso de la cultura a ciertos eones que él llama memes. ¿En qué se diferencian éstos de los *idola* de su paisano Francis Bacon, en particular los *idola theatri?* Los memes no son genes, porque no se replican, sino que perviven por transmisión oral o escrita; cita como ejemplos de los mismos: tonadas o sones, ideas, consignas, modas en cuanto a vestimenta, formas de fabricar vasijas o de construir arcos. Allí donde Dawkins se mueve con mayor firmeza se sospecha la sombra cercana de Maynard Smith. En el capítulo quinto: "Agresión: la estabilidad y la máquina egoísta", la fidelidad llega a la explicación (teoría de juegos), al modelo y al lenguaje (estrategias) y hasta los ejemplos (palomas y halcones). Con la diferencia de que Maynard Smith destaca la importancia del ambiente y Dawkins la olvida casi por completo.

A pesar de todo lo que antecede, *El gen egoísta* se ha convertido en punto de referencia para las investigaciones sociobiológicas y genéticas a un tiempo. Supone un esfuerzo de madurez de la propia ciencia de la conducta animal, considerada tiempo atrás como pura interrelación entre estímulos y respuestas. Las competencias específicas innatas fueron asentándose con los trabajos clásicos de Lorentz, Tinbergen, von Frisch, Wilson, Maynard Smith y otros. Dawkins recoge ese sólido cuerpo doctrinal y lo afinca en su terreno propio: los genes. Y sostiene rotundo que la selección natural no actúa sobre el individuo o la población, sino sobre un nivel anterior: los genes, sobre el acervo génico.

El gen egoísta, el ADN egoísta, ocupa hoy las páginas de preferencia de las revistas especializadas. Y todos los autores reconocen la paternidad de Dawkins en ese magnífico alumbramiento. El egoísmo llega a su propia expresión: no todo ADN se traduce en proteínas ni en señales reguladoras. No todo genotipo tiene, por fuerza, una manifestación fenotípica. Se cuartea así otro axioma de la teoría genética. Al parecer, los elementos transponibles procariotas (de los que se ocupaba la revista en un número reciente) y las secuencias ecuariotas autorrepetitivas son ejemplos de esos fragmentos egoístas de ADN que no poseen ninguna función fenotípica ni evolutiva. La propia selección natural dentro del genoma favorece la programación de los replicadores egoístas deseados.

Los defensores de la teoría del gen egoísta creen que las pruebas que la validen vendrán de tres líneas de trabajo. Primero, aislamiento de los segmentos del ADN que no poseen una función bien determinada y que se repiten en distintas regiones del cromosoma y en diferentes cepas de la misma especie. Segundo, si el aumento de ADN egoísta y su desplazamiento a lo largo del cromosoma no constituyen rarezas evolutivas, podrá estudiarse, por vía experimental, los mecanismos moleculares que se hallan implicados en esos procesos. En tercer y último lugar, se habrá de prestar atención a los efectos no específicos de ADN extra. Por lo que se ve, el barroquismo de la vida del que habla Margalef no se ciñe a los aspectos ecológicos, sino que llega a nuestra propia dotación génica. (L. A.)

MANUAL DE MEDICINA PSICOSOMATICA, por A. Haynal y W. Pasini. Editorial Toray-Masson, S.A.; 272 págs. 1980. La traducción del librito de Haynal y Pasini será, desde luego, bien acogida por los médicos españoles, hambrientos de alguna orientación simple sobre el tema de la medicina psicosomática, sobre la cual apenas existen publicaciones en nuestra lengua. Se han producido no obstante, en los últimos diez años, cambios bastante importantes en esta orientación de la medicina, que no han tenido reflejo más que en publicaciones aisladas y que nunca han sido objeto de un estudio sistemático.

Desde la publicación, ya para los años 1950-54, de las tres primeras ediciones de mi *Patología psicosomática* (1134 páginas), sólo había visto la luz algún libro sudamericano; y la desorientación del médico, no sólo en España, sobre estos problemas, era total. El libro de Haynal y Pasini servirá para abrir el apetito de los lectores de habla hispánica hacia obras de más envergadura. Pero por lo sucinto y completo de su alcance puede recomendarse sin vacilación, dada la desorientación que sobre este tema existe hoy en el mundo médico.

No sabemos si estará en trance de traducción el gran *Tratado* de Wiener, que es una patología general por su minuciosa exposición de los factores psicofisiológicos, aunque tiene el inconveniente de reducirse a un número breve de enfermedades (las llamadas equivocadamente "psicosomáticas"). El tratado que acaba de aparecer del profesor Jores es parecido al de los autores franceses y, como éste que comentamos, pone hincapié en la terapéutica, no olvidando las

actuales más de moda, como son las conductistas.

El libro más extenso y de más ambiciosa presentación en la patología psicosomática europea que acaba de publicarse bajo la dirección de Thure von Uexküll. Tiene una buena orientación, sobre todo en los aspectos teóricos, aunque yo discrepe de ella, como puede verse en mis últimas publicaciones, pero revela una preocupación filosófica de la que, quizá con acierto, por su carácter de "manual" han prescindido los autores de la obrita que comentamos.

Como era de esperar, tratándose de un libro francés, en el libro de Maynal y Pasini no se menciona en la parte histórica la atención que a esta orientación de la medicina venimos dedicando los españoles desde hace treinta años. En un momento en que los editores franceses no consideraban oportuna la publicación de libros de medicina psicosomática con el argumento de que estas cosas "no interesaban a los médicos franceses". En la *Historia Universal de la Medicina*, dirigida por P. Laín Entralgo, obra monumental en siete tomos y cuya traducción al inglés está en marcha, esta atención de los médicos españoles por la medicina psicosomática, muy anterior a la del resto de Europa, queda bien documentada. En ella presento una contribución histórica con indicación de mis ideas al respecto.

El libro de Haynal presta la debida atención a los problemas sociales, epidemiológicos, transculturales y ecológicos, aunque no queda muy clara de su lectura la trascendencia que en los últimos tiempos ha alcanzado la consideración de la enfermedad psicosomática como un proceso que ocurre dentro de la red familiar, cosa que en cambio tiene presente Thure von Uexküll. Echamos también muy de menos una exposición clara de la interacción entre factores genéticos y ambientales, sobre lo cual hay ya una riquísima literatura que explican las razones "biológicas" por las que el síndrome del desamparo o de pérdida de afecto (es decir, las alteraciones en la "urdimbre constitutiva" señaladas por mí en el año 1960) es la clave de la mayoría de los trastornos psicosomáticos, como ha puesto de manifiesto en multitud de trabajos la escuela de Rochester. Tanto más hay que señalar esta omisión de las bases neurofisiológica y neuroendocrinológicas de las "pérdidas de objeto" cuanto que la "teoría de Engel" es expuesta en este libro con gran detalle, pero sólo en su faceta psicoanalítica.

El manual de medicina psicosomática de Haynal y Passini tiene la contextura tradicional de los manuales médicos franceses. Un poco yuxtaposición de criterios, de opiniones, de datos, encuadrados dentro de una sistematización que a primera vista parece ordenada. En el fondo hay una mescolanza de patogenias no comprobadas, de observaciones sumarias y superficiales, de esbozos de explicación psicoanalítica que me temo mucho hagan perder al lector de la obra la claridad aparente.

La investigación y la clínica psicosomáticas, en los últimos cuarenta años, ha hecho más progresos de los que en este librito se pone de manifiesto. Para no señalar más que alguna muestra vemos que el colaborador que califica –a la vieja usanza de la psiquiatría francesa– de "erotomanía" una situación transferencial intensa, la achaca a un defecto de la enferma, insinuando incluso la palabra paranoia, cuando en realidad se trata de un defecto del médico. El cual no ha sabido reconocer un marcado "componente psicótico", o de lo que hoy se llama "borderline", en su paciente y por tanto "no ha sabido manejar la transferencia" con esta paciente con la cautela debida. Es curioso que esto no se enseñe ni siquiera en la psiquiatría tradicional, tratándose de algo tan importante en la práctica cotidiana del médico como saber palpar bien el hígado o escuchar un soplo cardíaco.

Otro error: el síndrome de Gilles de La Tourette que hace años con Frutos Carabias demostré se curaba con apomorfina, hoy se trata con diversos medicamentos –betabloqueantes, etcétera– de manera brillante, sin tener que recurrir a una psicoterapia profunda.

Pero más interesante que señalar alguna omisión, error o discrepancia me parece útil en esta revisión "situar" este librito de patología psicosomática dentro de la medicina científica actual, fuertemente influida por la práctica en las grandes instituciones sanitarias. No es baladí que, tras cuarenta años de menosprecio y olvido, retorne ahora tímidamente la patología psicosomática a pretender un puesto "menor" en la práctica médica. Leyendo manuales como este que comentamos, parece que el médico puede "adquirir una idea" de lo que la medicina psicosomática es. En realidad, nada más falso. Lo primordial, para enterarse bien de la medicina psicosomática, es, como ocurre siempre en medicina, vivir su clínica, vivirla plenamente. Esto sólo se puede conseguir con un nuevo arte de la anamnesis, con una nueva forma de interrogar al enfermo y sobre todo con una nueva y sutilísima manera de escuchar al paciente, que no es cosa fácil de aprender y que en este libro ni siquiera está insinuada. El estudiante de medicina psicosomática ha de aprender ésta en la realidad inmensamente nueva que brota de labios del paciente, en ese "otro mundo" que surge al modificar nuestras técnicas fundamentales de exploración del enfermo que son la "escucha" y la "actitud" con la que el médico acoge al enfermo.

Es interesante como fenómeno histórico que en una medicina muy tecnificada, de gran rigor científico, muy encajada dentro de una sociedad con características singulares ("narcisista" se le ha llamado), la medicina psicosomática rompa el hielo, pese a toda la indiferencia pasada, y trate de imponerse como especialidad. En el fondo de este resurgir hay motivaciones económicas y, sobre todo, el fracaso de la medicina exclusivamente técnica en solucionar los mil problemas que, disfrazados de enfermedades somáticas, complican hoy hasta la bancarrota las finanzas del Seguro de enfermedad. El librito de Haynal y colaboradores entra dentro de este "clima histórico". Pero el crítico tiene que proclamar que la medicina psicosomática es "otra cosa". Observación que hago extensiva a casi todas las patologías o fisiopatologías psicosomáticas –algunas como he dicho excelentes– que se publican en diversos países. No basta con enjuiciar con enfoque "psicosomático" a un enfermo al que vemos *una sola vez en la vida* y media hora. Lo importante en la consideración psicosomática es la observación a lo largo de toda la vida del enfermo –y a ser posible con conocimiento de la intrincada red familiar, decisiva en la enfermedad humana– del *entremezclamiento de enfermedad y destino*. Así fue considerada la patología psicosomática por sus grandes iniciadores Victor v. Weizsaacker y Siebeck y, como ha señalado Kütenmeyer, por científicos y experimentales que sean los criterios ahora aplicados –que los que conocen mis obras, saben que no rehúso, sino más bien todo lo contrario–, esta vinculación dramática de destino y enfermedad ha sido totalmente enmascarada y olvidada. No por error de los médicos sino porque es "ley de nuestro tiempo", escapatoria de nuestra estructura social en sus profundas capas.

Como es natural, tratándose de una obra francesa se expone con detalle la teoría actualmente más en moda: la de la "escuela de París". Según la cual lo crucial en el "enfermo psicosomático" sería el "fenómeno psicosomático". Consiste éste en un tipo especial de pensamiento, el "pensamiento operatorio" caracterizado por su pobreza de fantasía, por sus expresiones estereotipadas y casi "mecánicas", por su penuria en la vida onírica y su refugio en lo consuetudinario. Llámase hoy a este conjunto de características, "alexitimia", y encuentra

una gran resonancia incluso en Norteamérica y en la propia obra alemana de Thure von Uexküll a que acabo de hacer mención. El tema ha sido objeto de numerosas discusiones en revistas y congresos profesionales.

A mi juicio constituye un curiosísimo "artefacto" de nuestra cultura. No he podido observar esta "alexitimia" en mis pacientes. Parto del supuesto de que para mí *todo enfermo es psicosomático,* desde el cáncer a las anginas. Pero aun limitando el concepto psicosomático a las enfermedades clásicas, ulcus, asma o infarto de miocardio, mi experiencia es totalmente opuesta a la de la "escuela de París". Son enfermos de gran riqueza imaginativa, de una expresividad muy rica y que no difieren en su pensamiento de las llamadas personas normales. Por otra parte hoy, en nuestra "cultura narcisista", el pensamiento operatorio se observa en los normales y no hay estudios serios comparativos que demuestren que predomina en los enfermos de cualquier enfermedad, de tipo asmático, ulceroso o dermatológico. Los únicos "alexitímicos" que he visto en mi vida fueron los sometidos al método de observación de la escuela francesa y pienso, como Cremerius y como Schneider, que resultan, artificiosamente, de una forma especial de observación. Las supuestas comprobaciones "objetivas" de este fenómeno no resisten el más ligero análisis crítico.

Como he expuesto en otro lugar nos encontramos ante un fenómeno general de nuestra cultura, a la que se ha definido como "narcisista", esto es, como excesivamente seudoconsciente de su "racionalidad". Dicho en lenguaje psicoanalítico, con una sobrecarga exagerada del "Yo" a expensas del mundo instintivo, del "Ello" y del "Super-yo". Esto da lugar, aparte de los "paternalismos sin padre", de la aparición con excesiva frecuencia de trastornos del "sí mismo", etcétera, a una "mecanización" del pensamiento. Dicho en pocas palabras: una medicina psicosomática, arrancada de su auténtica raíz, que es el respeto al drama de la vida del enfermo, a la tragedia de la vicisitud biográfica, *en su totalidad,* reducida a consideraciones mecanicistas sobre el "stress" y otras perturbaciones de las regulaciones neuroendocrinas, etcétera, etcétera, tiene de común con esa "cultura narcisista" el haber perdido la "sensibilidad histórica", el sentido del tiempo, sobre todo el "biográfico" y dejar al paciente reducido de manera puntiforme al "aquí y ahora". El drama desaparece para dejar lugar al mecanismo.

De esta suerte no ha de extrañar que, después de treinta años empiece a ser "tolerada" por una medicina deshumanizada una patología psicosomática que, de manera disfrazada, también se ha deshumanizado. En el mundo actual, todo él "alexitímico", es natural que aparezcan médicos y enfermos alexitímicos. La patología psicosomática no puede ser considerada, a mi juicio, como un apéndice de la medicina científico-natural, ni siquiera, como en un tiempo creí, como una crítica de la misma, desde la totalidad del ser humano, sino, ante todo y sobre todo, como una crítica de nuestra cultura. La cual, en situación singularísima, puede constituir un nuevo punto de arranque para la humanidad, pero siempre que sepamos entender la situación en que el mundo occidental se encuentra.

Todas estas consideraciones no hacen más que aumentar el interés del libro de Haynal y Passini, que tiene la ventaja de transmitir al lector curioso por lo menos una visión esquemática de una orientación de la medicina que hasta ahora era cuidadosamente excluida de los habituales libros de medicina general y de las diversas especialidades. (J. R. C.)

ELECTROQUIMICA MODERNA, por J. O. M. Bockris y A. K. N. Reddy. Editorial Reverté. Barcelona 1980. Dos volúmenes de 1521 páginas de 21,5 × × 15,5 cms. Traducción de "Modern Electrochemistry" de Plenum P. C., Nueva York, por el doctor J. Beltrán. La electroquímica, que trata de la relación entre la electricidad y las reacciones químicas, está muy vinculada al desarrollo de la humanidad. El hombre primitivo se protegía del ambiente hostil, que le rodeaba, funcionando como una verdadera máquina bioelectroquímica, convirtiendo la energía solar almacenada en los alimentos en fuerza muscular por medio de reacciones de carácter electroquímico. Actualmente se observa una clara tendencia a que el hombre emplee lo menos posible sus propios convertidores de energía bioquímica y se sirva, de manera gradualmente creciente, de la tecnología desbordada que va creando. En esta tecnología la electroquímica se ha introducido plenamente en varios campos: producción industrial de cloro y de hidróxidos alcalinos por electrólisis de una salmuera, electrosíntesis de compuestos orgánicos (una fase de la síntesis del nylón), obtención del aluminio y de metales alcalinos y alcalinotérreos por electrólisis de sus sales fundidas, electrodisolución controlada de piezas metálicas para mecanizarlas.

En el plano biológico, la electroquímica explica el mecanismo de la transferencia de corrientes a través de los nervios y el consumo por parte de las células vivas, en forma electródica, de los productos de degradación de los alimentos y el oxígeno. No obstante, la razón de la inusitada actualidad que ha cobrado la electroquímica ha surgido de la crisis experimentada por las fuentes tradicionales de producción energética. Entre los procedimientos de conversión directa de energía, el método electroquímico es el más depurado y parece probable que sea llamado a adquirir, en un futuro inmediato, una importancia considerable; es decir, que se convierta en una indiscutible alternativa al problema de la producción y del almacenamiento convencionales de la energía.

Aunque, en principio, la electroquímica abarca un campo bastante especializado, no hay duda de que constituye un tema tan complejo como interesante y rico en matices. Matices termodinámicos y cinéticos de las reacciones iónicas y electródicas y matices en la elección de los ejemplos de aplicaciones que eran tratados desigualmente en los libros de texto existentes. Esta dificultad queda subsanada en la obra que comentamos, que tuvo su origen en unas lecciones dictadas durante un curso de electroquímica a alumnos de conversión de la energía en la Universidad de Pennsylvania. La formación científica de estos alumnos era dispar, pues procedían de los campos de la química, de la física, de la biología, de la metalurgia y de la ciencia de los materiales. Esta circunstancia obligó a los autores, personalidades de relevante prestigio en los ámbitos de la electroquímica y de la docencia, a concebir un libro que esquematizase el tema a un nivel comprensible por quienes procedían de diferentes disciplinas y, además, distintas de la electroquímica. Por este motivo los autores ordenaron adecuadamente los capítulos y cada uno lo iniciaron a partir de unos conocimientos elementales, los cuales se van incrementando, mediante el ponderado rigor científico de las deducciones, hasta llegar a una cota que permite la conexión del lector con las monografías especializadas más modernas y completas. El libro, constituido por dos tomos, contiene un mínimo, pero suficiente, de tratamiento termodinámico y un recomendable máximo de exposiciones conceptuales, presentadas mediante modelos de gran valor didáctico. A lo largo del mismo predomina el tratamiento, en el plano molecular, de la transferencia de cargas a partir de interfases, aspecto electroquímico poco divulgado hasta la aparición de la presente obra. Además, los autores opinan que el área asociada

realmente con la electroquímica es el área de los fenómenos electródicos, mientras que el campo de los procesos iónicos constituye un campo adjunto y, por tanto, necesario de esta especialidad.

En el primer tomo se explica el concepto de la electroquímica básica y el de la cuántica así como las relaciones con otras ciencias, lo cual constituye el tema del primer capítulo. A continuación, en el capítulo 2, los autores estudian las interacciones ion-disolvente, tanto desde el punto de vista no estructural como el estructural y, en el capítulo 3, las interacciones ion-ion en electrolitos verdaderos y potenciales y la teoría de Debye-Hückel. El transporte iónico por difusión y por conducción en disoluciones líquidas, acuosas y no acuosas, es objeto de estudio en el capítulo 4. En el capítulo siguiente, el 5, se estudian los protones en disolución: su solvatación y su transporte, además de las reacciones de transferencia de protones. Este tomo termina con el capítulo 6, donde se analiza la naturaleza de los líquidos iónicos y la formación de complejos.

El segundo tomo consta de cinco capítulos, en el primero de los cuales, el 7, se describe la interfase electrizada desde el aspecto termodinámico y desde el de los modelos estructurales. En los capítulos 8 y 9 se establecen las bases teóricas de la electródica, desde la ecuación de Butler-Volmen hasta la determinación de las etapas sucesivas del mecanismo de una reacción electródica pasando por los aspectos cuánticos de las reacciones de transferencia de carga en la interfase electrodo-disolución. Finalmente, en el capítulo 10 se describen las reacciones electródicas más interesantes: la electrocatálisis, el crecimiento electrolítico de metales sobre los electrodos, las reacciones en que se desprende hidrógeno y la electronización del oxígeno, y en el capítulo 11 se discuten sistemas electroquímicos de interés tecnológico: la corrosión y la estabilidad de los metales, la conversión electroquímica de la energía y el almacenamiento de la electricidad.

En resumen, se trata de un libro de texto ponderado en la extensión, profundo en la concepción, riguroso en la exposición, interesante en la temática, ameno en la ilustración, pedagógico en el nivel, traducido con competencia y editado con esmero. Un libro que se recomienda sin reservas no sólo a quienes deseen trabajar con ideas modernas de electroquímica en las áreas de la química, la física, la biología y la ciencia de los materiales, sino también a aquellos que deseen iniciar sus investigaciones acerca de la transferencia de carga en la interfase y temas afines. (P. M.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

GUERRA QUIMICA: REARME O DESARME

CHEMICAL WARFARE: A STUDY IN RESTRAINTS. Frederic J. Brown. Princeton University Press, 1968.

CHEMICAL AND BIOLOGICAL WEAPONS. Matthew S. Meselson en *Scientific American*, vol. 222, n.º 5, págs. 15-25; mayo, 1970.

THE PROBLEM OF CHEMICAL AND BIOLOGICAL WARFARE. Stockholm International Peace Research Institute. Humanities Press, 1971-1975.

CHEMICAL WEAPONS AND CHEMICAL ARMS CONTROL. Dirigido por Matthew Meselson. Carnegie Endowment for International Peace, 1978.

POLITICAL ISSUES, VOL. 6, NO. 2: CHEMICAL/BIOLOGICAL WARFARE, A SELECTED BIBLIOGRAPHY. Center for the Study of Armament and Disarmament, California State University, 1979.

EXCITACIONES EN SUPERFICIES SOLIDAS

PRINCIPLES OF SURFACE CHEMISTRY. G. A. Somorjai. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1972.

INTERACTIONS ON METAL SURFACES. Dirigido por R. Gomer. Springer-Verlag, Berlín, Heidelberg, New York, 1975.

INTRODUCTION TO THE THEORY OF SOLID SURFACES. F. García Moliner y F. Flores. Cambridge University Press, 1979.

MUERTE SUBITA DEL NIÑO

PROCEEDINGS OF THE FRANCIS E. CAMPS INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUDDEN AND UNEXPECTED DEATHS IN INFANCY. Dirigido por Robert R. Robinson. Canadian Foundation for the Study of Infant Deaths, Toronto, 1974.

SUDDEN UNEXPLAINED INFANT DEATH, 1970 THROUGH 1975: AN EVOLUTION IN UNDERSTANDING. Marie Valdes-Dapena en *Pathology Annual*, vol. 12, parte 1, págs. 117-145; 1977.

SUDDEN INFANT DEATH SYNDROME (CRIB DEATH). Warren G. Guntheroth en *American Heart Journal*, vol. 93, n.º 6, págs. 784-793; junio, 1977.

PROTEINAS UTILES OBTENIDAS A PARTIR DE BACTERIAS RECOMBINANTES

A BACTERIAL CLONE SYNTHESIZING PROINSULIN. Lydia Villa-Komaroff, Argiris Efstradiadis, Stephanie Broome, Peter Lomedico, Richard Tizard, Stephen P. Naber, William L. Chick y Walter Gilbert en *Proceedings of the Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 75, n.º 8, págs. 3727-3731; agosto, 1978.

SYNTHESIS IN *E. COLI* OF A POLYPEPTIDE WITH HUMAN LEUKOCYTE INTERFERON ACTIVITY. Shigekazu Nagata, Hideharu Taira, Alan Hall, Lorraine Johnsrud, Michel Streuli, Josef Escödi, Werner Boll, Kari Cantell y Charles Weissmann en *Nature*, en prensa.

THE SYNTHESIS OF EUKARYOTIC PROTEINS IN PROKARYOTIC CELLS. Lydia Villa-Komaroff en *Gene Structure and Expression*, dirigido por D. H. Dean, L. F. Johnson, P. C. Kimball y P. S. Perlman. Ohio State Press, en prensa.

VIDRIOS METALICOS

METALLIC GLASSES. John J. Gilman en *Physics Today*, vol. 28, n.º 5, págs. 46-53; mayo, 1975.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF METALLIC GLASSES. P. Chaudhari y D. Turnbull en *Science*, vol. 199, n.º 4324, págs. 11-21; 6 de enero de 1978.

ESTRUCTURA DEL UNIVERSO PRIMITIVO

MODERN COSMOLOGY. D. W. Sciama. Cambridge University Press, 1971.

PHYSICAL COSMOLOGY. P. J. E. Peebles. Princeton University Press, 1971.

THE FIRST THREE MINUTES: A MODERN VIEW OF THE ORIGIN OF THE UNIVERSE. Steven Weinberg. Basic Books, 1977. (Traducción española de Alianza Editorial.)

PARTICLE PHYSICS AND COSMOLOGY. David N. Schramm y Michael S. Turner en *Physics Today*, vol. 32, n.º 9, págs. 42-48; septiembre, 1979.

THE BIG BANG. Joseph Silk. W. H. Freeman and Company, 1980.

ECOLOGIA SOCIAL DE LOS COYOTES

FEEDING AND SOCIAL BEHAVIOR OF THE STRIPED HYENA *(HYAENA VULGARIS)*. H. KRUUK en *East African Wildlife Journal*, vol. 14, págs. 91-111; 1976.

BEHAVIORAL ECOLOGY. Dirigido por J. R. Krebs y N. B. Davies. Sinauer Associates, Inc., 1978.

THE CLEVER COYOTE: Stanley P. Young y Hartley y H.T. Jackson. University of Nebraska Press, 1978.

COYOTES: BIOLOGY, BEHAVIOR, AND MANAGEMENT. Dirigido por Marc Bekoff. Academic Press, 1978.

THE RELATIONSHIP BETWEEN FOOD COMPETITION AND FORAGING SIZE GROUP IN SOME LARGER CARNIVORES. J. Lamprecht en *Zeitschrift für Tierpsychologie*, vol. 46, págs. 337-343; 1978.

TRANSPORTE DE SUSTANCIAS EN LAS CELULAS NERVIOSAS

AXOPLASMIC TRANSPORT (WITH PARTICULAR RESPECT TO ADRENERGIC NEURONS). Annica Dahlström en *Philophical Transactions of the Royal Society of London*, serie B, vol. 261, págs. 325-358; 1971.

AXONAL TRANSPORT: THE INTRACELLULAR TRAFFIC OF THE NEURON. Bernice Grafstein en *Handbook of Physiology*, dirigido por Eric R. Kandel. American Physiological Society, 1977.

AXONAL TRANSPORT: COMPONENTS, MECHANISMS AND SPECIFICITY. James H. Schwartz en *Annual Review of Neuroscience*, vol. 2, págs. 467-504; 1979.

JUEGOS MATEMATICOS

A BOOK OF CURVES. Edward H. Lockwood. Cambridge University Press, 1961.

MAXWELL'S OVALS AND THE REFRACTION OF LIGHT. Milton H. Sussman en *American Journal of Physics*, vol. 34, n.º 5, págs. 416-418; mayo, 1966.

TALLER Y LABORATORIO

MOIRÉ EFFECT FROM RANDOM DOTS. Leon Glass en *Nature*, vol. 223, n.º 5206, págs. 578-580; 9 de agosto de 1969.

PERCEPTION OF RANDOM DOT INTERFERENCE PATTERNS. Leon Glass y Rafael Pérez en *Nature*, vol. 246, n.º 5432, págs. 360-362; 7 de diciembre de 1973.

KINETIC CYCLOPEAN EFFECT. R. I. MacDonald en *Nature*, vol. 249, n.º 5453, pág. 192; 10 de mayo de 1974.